



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

LABORATORNÍ ÚLOHA ZAMĚŘENÁ NA VŠEPROPUSTNÉ FÁZOVACÍ ČLÁNKY

LABORATORY EQUIPMENT AIMED ON THE ALL-PASS FILTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Lokaj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Jakub Lokaj

ID: 203515

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní úloha zaměřená na všepropustné fázovací články

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se detailně s principy a vlastnostmi všepropustných fázovacích článků různých řádů. Prostudujte známé obvodové realizace fázovacích článků, a to jak aktivních tak i pasivních. Navrhněte obsah a formu laboratorní úlohy, jejíž náplň je zaměřena na ověření koncepcí všepropustných fázovacích článků. Jednotlivé struktury ověřte v obvodovém simulátoru Orcad Pspice.

Vámi navržený laboratorní přípravek prakticky realizujte. Jednotlivé body laboratorní úlohy proměřte a vytvořte vzorový protokol o měření. Nakonec posuďte, zda se naměřené charakteristiky shodují s teoretickými předpoklady.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. Kmitočtové filtry. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-0-3-7.

[2] DELIYANNIS, T., Yichuang SUN a J.K FIDLER. Continuous-time active filter design. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c1999. ISBN 0-8493-2573-0.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá teoretickým návrhom a realizáciou fázovacích filtrov. Jedná sa o využitie pasívnych a aktívnych prvkov vo fázovacích obvodoch a následnú aplikáciu v laboratórnom prípravku. Funkčnosť návrhov bola overená v simulačnom programe LTspice a SNAP3v2. V reálnom zapojení aktívnych fázovacích filtrov sú pre zapojenia s CCII+, OTA a operačným zosilňovačom použité integrované obvody ako TL071, AD844 a LT1228. Bakalárska práca tak isto navrhuje koncepciu laboratórneho prípravku, kde bude možné porovnať funkčnosť fázovacích filtrov so simulovanými výsledkami.

Klíčová slova

všeproustní fázovací filter, operační zesilovač, konvektor, transkonduktor, fáze

Abstract

Theme of bachelor project is design and realisation of allpass filters. It consists of using passive and active components in design of allpass filters and followed by realisation in laboratory equipment. Functionality was verified in simulating software LTspice and SNAP3v2. In real implementation were used integrated circuits such as TL071, AD844 and LT1228 for CCII+, OTA and design with op-amp. This bachelor project includes concept of laboratory equipment, where will be compared functionality of allpass filters with simulated results

Keywords

allpass filter, operational amplifier, conveyor, transconductor, phase

Bibliografická citácia:

LOKAJ, Jakub. *Laboratorní úloha zaměřená na všepropustné fázovací články*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126092>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jiří Petržela.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jakub Lokaj*

VUT ID studenta: *203515*

Typ práce: *Bakalárska práca*

Akademický rok: *2019/20*

Téma závěrečné práce: *Laboratórni úloha zaměřená na všepropustné fázovací články*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **4.6.2020**

.....

Podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	10
1.1.	Frekvenčné filtre a ich použitie	10
1.2.	Spôsoby realizácie frekvenčných filtrov.....	10
1.3.	Obvod ako dvojbrána.....	10
1.4.	Charakteristické matice dvojbrán.....	11
1.5.	Základné obvodové funkcie	11
1.6.	Frekvenčné charakteristiky	11
1.7.	Nulové body a póly a ich rozdelenie	12
1.8.	Operačný zosilňovač (OZ)	13
1.9.	Prúdové konvejory	14
2.	Fázovací článok všeobecne	15
3.	Kaskádna syntéza	19
4.	Pasívne Fázovacie filtre	22
4.1.	Návrh fázovacích článkov RC 1. rádu.....	22
4.2.	Realizácia LRC fázovacích článkov.....	25
5.	Aktívne fázovacie články	31
5.1.	Aktívny fázovací článok 1. rádu.....	31
5.2.	Aktívny fázovací článok 2. rádu.....	32
5.3.	Fázovací článok prvého rádu s CCII+	33
5.4.	Fázovací článok prvého rádu s OTA	35
5.5.	Transimpedančný fázovací článok prvého rádu so zosilňovačom OTRA	36
6.	Laboratórny prípravok.....	39
7.	Návrh potlače laboratórneho prípravku.....	41
8.	Zmerané frekvenčné charakteristiky	42
9.	Schéma prípravku a doska plošného spoja	43
10.	Vzor Laboratórne úlohy: Fázovacie filtre	45
11.	Záver	52

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Znázornenie dvojbrány.....	11
Obrázok 2 Schematické zapojenie operačného zosilňovača OA-DISO	13
Obrázok 3: Teoretické rozloženie núl a pólov pri fázovacom článku 1. rádu.....	16
Obrázok 4 Teoretická fázová a frekvenčná charakteristika fázovacieho článku 1. rádu.....	17
Obrázok 5: Teoretické rozloženie núl a pólov pri fázovacom článku 2. rádu.....	17
Obrázok 6: Teoretická fázová a frekvenčná charakteristika fázovacieho článku 2. rádu	18
Obrázok 7: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 1. rádu, MathCad	19
Obrázok 8: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 2. rádu, MathCad	19
Obrázok 9: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 3. rádu, MathCad	20
Obrázok 10: : Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 4. rádu, MathCad.....	20
Obrázok 11: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 5. rádu, MathCad	21
Obrázok 12 Zapojenie RC fázovacieho filtra 1. rádu v programe SNAP s jedným kondenzátorom.....	23
Obrázok 13 Výsledok simulovaného obvodu v programe SNAP z Voltage gain (open output) analýzy	23
Obrázok 14 Simulácia pomocou programu SNAP v f-domain.....	23
Obrázok 15 Rozloženie núl a pólov, SNAP	23
Obrázok 16 Zapojenie RC fázovacieho filtra 1. rádu v programe SNAP s dvoma kondenzátormi.....	24
Obrázok 17 Výsledok symbolickej analýzy (Voltage gain - open output), Snap	24
Obrázok 18 Výsledok analýzy v f-domain, SNAP.....	24
Obrázok 19 Rozloženie nulových bodov a pólov, SNAP	24
Obrázok 20: Priebeh modulu a fázy fázovacieho článku RC 1. rádu, LTspice.....	25
Obrázok 21 Fázovací článok s RLC.....	25
Obrázok 22 Zapojenie krížového článku, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1	26
Obrázok 23 Zapojenie odvodené z krížového článku, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1.....	26
Obrázok 24 Ekvivalentné zapojenie RLC fázovacieho filtra 1. rádu a) a b), In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1	27
Obrázok 25 Fázovací článok RLC s $Q < 1$, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1	27
Obrázok 26 Fázovací článok RLC s $Q > 1$, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1	28
Obrázok 27: Fázovací filter RLC 1. rádu, SNAP.....	28
Obrázok 28: Symbolická analýza fázovacieho RLC filtra 1. rádu, snap.....	28
Obrázok 29: Analýza RLC fázovacieho článku 1. rádu v f-domain, SNAP.....	28
Obrázok 30: Rozloženie nulových bodov a pólov pre RLC fázovací článok 1. rádu	29
Obrázok 31: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre RLC fázovací článok 1. rádu, LTspice.....	29
Obrázok 32: RLC fázovací článok 2. rádu, SNAP	29
Obrázok 33: Symbolická analýza RLC fázovacieho filtra 2. rádu, SNAP.....	30
Obrázok 34: Analýza RLC fázovacieho filtra 2. rádu v f-domain, SNAP	30
Obrázok 35: Rozloženie núl a pólov RLC fázovacieho filtra 2. rádu, SNAP	30

Obrázok 36: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre RLC fázovací článok 2. rádu, LTspice.....	30
Obrázok 37: Fázovací článok 1. rádu s aktívnym prvkom.....	31
Obrázok 38: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre aktívny fázovací článok 1. rádu, LTspice.....	32
Obrázok 39: Fázovací článok 2. rádu s aktívnym prvkom [online]. 25.11.2019, Dostupné z: https://www.rfwireless-world.com/Terminology/All-Pass-Filter-basics-and-types.html	32
Obrázok 40: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre aktívny fázovací článok 2. rádu, LTspice.....	33
Obrázok 41: Skupinové oneskorenie pre aktívny fázovací článok 2. rádu, LTspice	33
Obrázok 42: Zapojenie fázovacieho článku s CCII+ 1.rádu, In: PETRŽELA, J. Elektrické filtry. Online prednášky. FEKT VUT v Brně, 2011.....	34
Obrázok 43: Priebeh fázy a modulu Fázovacieho článku s CCII+ 1.rádu, spice.....	34
Obrázok 44: Skupinové oneskorenie fáz. článku s CCII+ 1.rádu, spice.....	34
Obrázok 45: konfigurácia pinov LT1228 Obrázok 46: Schematická značka LT1228	35
Obrázok 47: Zapojenie simulovaného fázovacieho filtra 1. rádu s OTA, spice.....	35
Obrázok 48: Priebeh modulu a fázy fázovacieho článku 1.rádu s OTA, spice	36
Obrázok 49: Skupinové oneskorenie fázovacieho článku 1.rádu s OTA, spice.....	36
Obrázok 50: Konfigurácia fázového článku s členom OTRA.....	37
Obrázok 51: Fázovací článok s prvkom OTRA, priebeh fázy a modulu, LTspice.....	37
Obrázok 52: Skupinové oneskorenie fázovacieho článku s OTRA, LTspice	38
Obrázok 53: Návrh merania 4. úlohy v laboratórnom prípravku.....	39
Obrázok 54: RC pasívny fázovací článok s rozdielovým OZ (simulácia v LTspice – modul + fáza)....	40
Obrázok 55: Simulovaný obvod RC pasívneho fázovacieho článku v LTspice	40
Obrázok 56: Vrchný motív laboratórneho prípravku.....	41
Obrázok 57: Zmeraná charakteristika fáze a modulu aktívneho fázovacieho filtra s TL072 (1.rádu) .	42
Obrázok 58: Zmeraná charakteristika fáze a modulu fázovacieho filtra 1.rádu s CCII+ (AD844)	42
Obrázok 59: Schéma laboratórneho prípravku.....	43
Obrázok 60: TOP layer návrhu plošného spoja.....	44
Obrázok 61: BOTTOM layer návrhu plošného spoja	44
Obrázok 62: Priebeh modulu a fáze fázovacieho filtra 1.rádu.....	45

Zoznam tabuliek

<i>Tabuľka 1: Znázornenie dvojbrány</i>	<i>13</i>
<i>Tabuľka 2 Schematické zapojenie operačného zosilňovača OA-DISO</i>	<i>15</i>

1. Úvod

1.1. Frekvenčné filtre a ich použitie

Frekvenčné filtre sú lineárne elektrické obvody, používané v mnohých elektrotechnických oblastiach. Ich hlavnou úlohou je selekcia frekvenčných zložiek prechádzajúceho signálu podľa ich frekvencií. Filtre obvykle niektoré frekvenčné zložky prepúšťajú bez útlmu, táto oblasť sa nazýva priepustné pásmo, iné zložky však potlačujú. Toto pásmo nazývame nepriepustné pásmo, pásmo potlačenia alebo útlmu. Tieto vlastnosti zvyčajne vyjadrujeme modulovou (amplitúdovou) frekvenčnou charakteristikou, ktorá reprezentuje závislosť modulu napäťového prenosu na frekvencii.

Prechodom signálu cez filter vedie taktiež k vzniku časového oneskorenia signálu, čo je dôsledkom fázových posunov prechádzajúcich harmonických zložiek signálu. Tieto vplyvy vyjadrujeme fázovou frekvenčnou charakteristikou. Fázové vplyvy filtru na signál v priepustnom frekvenčnom pásme sa v časovej oblasti prejavujú napríklad ako nežiadúce prekmity či zvlnenie priebehu signálu. Tieto vplyvy však môžeme obmedziť vhodnou voľbou filtru a tak ich minimalizovať. No na druhej strane existujú prípady, kedy tieto vlastnosti zámerne využívame, napríklad vo fázovacích a oneskorovacích obvodoch.

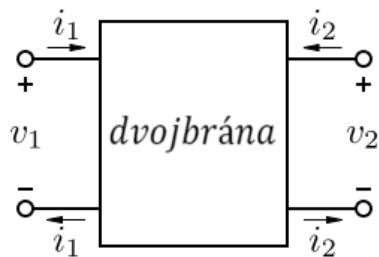
1.2. Spôsoby realizácie frekvenčných filtrov

Frekvenčné filtre môžeme v praxi realizovať pomocou mnoho odlišných spôsobov, ktoré do určitej miery určujú aj niektoré podstatné vlastnosti filtru. Realizáciu môžeme rozdeliť do troch hlavných skupín:

1. Realizácia pomocou diskrétnych prvkov (rezistory, kondenzátory, cievky, OZ a pod.)
2. Realizácia pomocou integrovaného bloku, ktoré poskytuje menšiu veľkosť, nižšiu cenu pri výrobe. No na druhej strane si užívateľ nemôže upraviť tento filter podľa svojich požiadavok (musí dodržať zapojenie podľa výrobcu).
3. Realizácia pomocou číslicových filtrov, ktorá spočíva v číslicovom spracovaní signálu, kde interpretáciu signálu upravujeme matematicky tak, aby výsledný signál mal po spätnej prevode zhodné vlastnosti ako po prechode normálnym frekvenčným filtrom.

1.3. Obvod ako dvojbrána

Pomenovanie dvojbrána znamená elektrický obvod alebo zariadenie s dvoma párami vývodov (vstupné a výstupné) na pripojenie externých obvodov. Na svorkách skúmame chovanie obvodu (prúd a napätie). Dvojportový sieťový model sa používa v matematickej analýze obvodov na izoláciu častí väčších obvodov. Sieť s dvoma portami sa považuje za „black box“, ktorej vlastnosti sú špecifikované maticou čísel. To umožňuje ľahko vypočítať odozvu siete na signály privádzané na porty, bez riešenia všetkých vnútorných napätí a prúdov v sieti. Umožňuje tiež ľahké porovnávanie podobných obvodov alebo zariadení. Pokiaľ je daná dvojbrána lineárna, tak vstupné a výstupné napätia sú dané ako rozdiel príslušných uzlových napätí, rovnako ako prúdy pretekajúce oboma pólmi jednej brány, ktoré sa líšia len v znamienku. Typické použitie dvojbrán je u transformátorov, deličov napätia, elektronických filtrov a zosilňovačov.



Obrázok 1: Znáozornenie dvojbrány

1.4 Charakteristické matice dvojbrán

Impedančná matica dvojbrány $Z = \{z_{ij}\}$, vyjadruje napätie pomocou prúdov $U_1, U_2 = f(I_1, I_2)$

$$\begin{bmatrix} U_1 & U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Admitančná matica dvojbrány $Y = \{y_{ij}\}$, vyjadruje prúdy pomocou napätí $I_1, I_2 = f(U_1, U_2)$

$$\begin{bmatrix} I_1 & I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 & U_2 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

1.5 Základné obvodové funkcie

Prenos napätia na výstupe naprázdno alebo so záťažou Z_z

$$K_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (1.3)$$

Prenos prúdu na výstupe nakrátko alebo so záťažou Z_z

$$K_I = \frac{-I_{out}}{I_{in}} \quad (1.4)$$

Vstupná impedancia alebo admitancia pri výstupe naprázdno, nakrátko alebo so záťažou

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} \quad (1.5)$$

$$Y_{in} = \frac{I_{in}}{U_{in}} \quad (1.6)$$

Výstupná impedancia alebo admitancia na vstupe naprázdno alebo so záťažou Z_G

$$Z_{out} = \frac{U_{out}}{I_{out}} \quad (1.7)$$

$$Y_{out} = \frac{I_{out}}{U_{out}} \quad (1.8)$$

1.6 Frekvenčné charakteristiky

Pri lineárnej dvojbráne vyvolá harmonické budenie $X(\omega)$ harmonickú odozvu $Y(\omega)$

$$\dot{F}(\omega) = \frac{\dot{Y}(\omega)}{\dot{X}(\omega)} = \frac{Y(\omega)e^{j\varphi_2(\omega)}}{X(\omega)e^{j\varphi_1(\omega)}} = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} e^{j[\varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)]} \quad (1.9)$$

$$\dot{F}(\omega) = |\dot{F}(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} = \text{Re}[\dot{F}(\omega)] + j\text{Im}[\dot{F}(\omega)]$$

\swarrow modulová \uparrow fázová(argumentová) \nwarrow hodograf

Obrázok 1. Súvislosť kmitočtových charakteristík

Modulovú, argumentovú frekvenčnú charakteristiku a zisku v dB môžeme dostať nasledujúcimi výpočtami:

$$K(\omega) = \sqrt{\text{Re}[K(\omega)]^2 + \text{Im}[K(\omega)]^2} \quad (1.10)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}[K(\omega)]}{\text{Re}[K(\omega)]} \quad (1.11)$$

$$k(\omega) = 20 \log K(\omega) \quad (1.12)$$

1.7 Nulové body a póly a ich rozdelenie

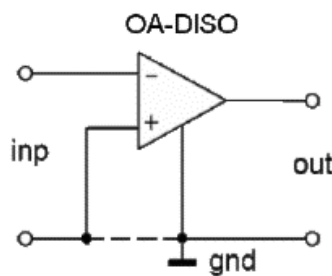
Podľa počtu a polohy nulových bodov a pólov vieme odhadnúť vlastnosti obvodu ako rýchlosť zmeny nulových bodov a pólov, čo predstavuje chovanie obvodu na zmenu parametrov.

Tabuľka 1.: Popis a rozdelenie pólov a núl

	Prenos $K(s)$	Frekvenčná charakteristika $K(j\omega)$	Modulovo frekvenčná charakteristika $K(\omega)$	Argumentová charakteristika $\varphi(\omega)$
Nulový bod v počiatku	$K_0 s$	$K_0 j\omega$	$20 \log \log(K_0) + 20 \log \log(\omega)$	$\varphi_0 + \frac{\pi}{2}$
Pól v počiatku	$\frac{K_0}{s}$	$\frac{K_0}{j\omega}$	$20 \log \log(K_0) - 20 \log \log(\omega)$	$\varphi_0 - \frac{\pi}{2}$
Reálny záporný nulový bod	$K_0(s + z_1)$	$1 + \frac{j\omega}{z_1}$	$20 \log \log\left(\sqrt{z_1^2 + \omega^2}\right) - 20 \log \log(z_1)$	$\arctg\left(\frac{\omega}{z_1}\right)$
Reálny nulový kladný bod	$\frac{z_1 - s}{z_1}$	$1 - \frac{j\omega}{z_1}$	$20 \log \log\left(\sqrt{z_1^2 + \omega^2}\right) - 20 \log \log(z_1)$	$\arctg\left(-\frac{\omega}{z_1}\right)$
Reálny záporný pól	$\frac{p_1}{p_1 + s}$	$\left(1 + \frac{j\omega}{p_1}\right)^{-1}$	$20 \log \log\left(\frac{p_1}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}}\right) - 20 \log \log\left(1 + \frac{\omega^2}{p_1^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$	$\arctg\left(-\frac{\omega}{p_1}\right)$
Reálny kladný pól	$\frac{K_0}{s - p_1}$	$\left(1 + \frac{j\omega}{p_1}\right)^{-1}$	$20 \log \log\left(\frac{p_1}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}}\right) - 20 \log \log\left(1 + \frac{\omega^2}{p_1^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$	$\arctg\left(\frac{\omega}{p_1}\right)$

1.8 Operačný zosilňovač (OZ)

Sú to v súčasnosti najviac používanými funkčnými blokmi analógových obvodov. Ideálny operačný zosilňovač (IOU) je neregulárny dvojbran. Klasický štandardný OU je konštruovaný ako zosilňovač napätia s vysokým zosilnením (min 104 až 106), založený na diferenčnom stupni s tranzistormi. Napätový operačný zosilňovač (OVA) alebo nazývaný OA-DISO je využívaný k realizácii invertujúcich, neinvertujúcich napätových zosilňovačov a sledovačov. Býva štandardne jednosmerne symetricky napájaný. Obvykle $\pm 15V$, uprostred týchto svoriek je obvod uzemnený.



Obrázok 2 Schematické zapojenie operačného zosilňovača OA-DISO

Vlastnosti ideálneho operačného zosilňovača

1. nekonečne veľké napätové zosilnenie ($A = \infty$)
2. nekonečne veľký vstupný odpor ($R_{in} = \infty$)
3. nulový výstupný odpor ($R_{out} = 0$)
4. nekonečne veľká šírka pásma (nulové oneskorenie signálu prechádzajúceho zosilňovačom)
5. nekonečná vstupná impedancia
6. nulová výstupná impedancia
7. nekonečnou šírku pásma (zosilňuje od nulové do nekonečné frekvencie)
8. nulový šum

Reálny operačný zosilňovač

Jednosmerné parametre

1. zisk nie je nekonečný
2. vstupný odpor nie je nekonečný
3. nenulový výstupný odpor
4. nenulový vstupný prúd
5. nenulové ofsetové napätie

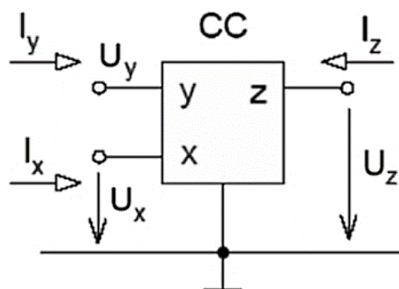
Striedavé parametre

1. OZ dokáže zosilňovať iba do určitej frekvencie
2. Vstupná kapacita – vysokofrekvenčné obvody

1.9 Prúdové konvejory

Sú to moderné funkčné mnohobraný, s rôzne definovanými vzťahmi medzi bránovými veličinami. Konvejovaním rozumieme sledovanie U a I, poprípade sledovanie s inverziou. Konvejory majú lepšie frekvenčné vlastnosti než štandardné OZ. Používajú sa na vyšších frekvenciách, v tzv. prúdovom móde. Konvektor CCII+ je definovaný týmito vzťahmi medzi bránovými veličinami:

$$U_x = U_y, I_y = 0, I_z = I_x \quad (1.13)$$



Obrázok 3 Trojbranový konvektor (CC II), In: Elektrovue [online]. 25.11.2019, Dostupné z: <http://www.elektrovue.cz/clanky/00002/index.html>

Všeobecný konvektor je popísaný nasledujúcou maticou rovníc

$$\begin{bmatrix} U_x & I_y & I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \beta & 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x & U_y & U_z \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

[3] Ak je v rovnici (1) $\alpha = 1$, uvažujeme neinvertujúci prúdový konvektor, ktorý sa označuje písmenami CC, zatiaľ čo $\alpha = -1$ charakterizuje invertujúci prúdový konvektor ICC. Keď $\beta = 1$, hovoríme o prúdovom konvejore prvej generácie (CCI alebo ICCI), ak je $\beta = 0$, jedná sa o prúdový konvektor druhej generácie (CCII alebo ICCII), avšak pri $\beta = -1$ pracujeme s prúdovým konvektorom tretej generácie (CCIII alebo ICCIII). Keď koeficient γ má hodnotu 1, jedná sa o pozitívny prúdový konvektor, ktorý sa označuje znamienkom plus za symbolickým označením (napr. CCII +), keď γ má hodnotu -1, uvažujeme tzv. Negatívne prúdový konvektor, označovaný znamienkom mínus. Preto zavedený GCC má vlastnosti dvanástich konkrétnych prúdových konvektorov.

Tabuľka 2 Možné realizácie admitančnej funkcie konvektoru

GCC	CCI+	CCI-	CCII+	CCII-	CCIII+	CCIII-	ICCI+	ICCI-	ICCII+	ICCII-
α	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
β	1	1	0	-1	-1	-1	1	0	0	0
γ	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

2. Fázovací článok všeobecne

Umožňujú upravovať fázovú charakteristiku bez zmeny modulovej charakteristiky. Fázovacie články sa využívajú v oneskorovacích článkoch, fázovacích korektoroch, vo vyrovnávačoch fázového posunu alebo namiesto integrátorov. Všeobecný prenos fázovacieho článku prvého radu má takýto tvar modulovej frekvenčnej charakteristiky:

$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (2.1)$$

$$|K(j\omega)| = K_0 \frac{\sqrt{\omega^2 - \omega_0^2}}{\sqrt{\omega^2 + \omega_0^2}} = K_0 \quad (2.2)$$

Fázová frekvenčná charakteristika má tvar:

$$\varphi(\omega) = -2 \cdot \arctan \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.3)$$

Skupinové oneskorenie:

$$\tau(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \frac{2}{\omega_0} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (2.4)$$

Všeobecný prenos fázovacieho článku druhého radu je možné vyjadriť vzt'ahom

$$K(s) = K_0 \frac{s^2 - b_1s + b_0}{s^2 + b_1s + b_0} = \frac{(s - n_1)(s - n_2)}{(s - p_1)(s - p_2)} = \frac{s^2 - (n_1 + n_2)s + n_1n_2}{s^2 - (p_1 + p_2)s + p_1p_2} \quad (2.5)$$

Poloha nulových bodov a pólov sa dá odvodiť

$$n_1 + n_2 = b_1, \quad p_1 + p_2 = -b_1, \quad n_1n_2 = b_0, \quad p_2 = b_0 \quad (2.6)$$

Pre komplexné hodnoty nulových bodov a pólov dostávame

$$(Re \, \dot{n})^2 + (Im \, \dot{n})^2 = (Re \, \dot{p})^2 + (Im \, \dot{p})^2 \quad (2.7)$$

$$Re \, \dot{n} = -Re \, \dot{p} \quad (2.8)$$

Modulová frekvenčná charakteristika je konštantná, frekvenčne nezávislá

$$|K(j\omega)| = K_0 \frac{\sqrt{(b_0 - \omega^2)^2 - (b_1\omega)^2}}{\sqrt{(b_0 - \omega^2)^2 + (b_1\omega)^2}} = K_0 \quad (2.9)$$

Pre stabilný obvod ležia póly v ľavej pol rovine komplexnej roviny a nulové body v pravej pol rovine symetricky vzhľadom k imaginárnej ose komplexnej roviny.

Fázová frekvenčná charakteristika a odpovedajúce skupinové oneskorenie bude

$$\varphi(\omega) = -2\arctan \frac{b_1\omega}{b_0 - \omega^2} \quad (2.10)$$

$$\tau(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \frac{2b_1(b_0 + \omega^2)}{\omega^4 - 2\omega^2b_0 + \omega^2b_1^2 + b_0^2} \quad (2.11)$$

Počiatkové skupinové oneskorenie pre fázovací článok prvého a druhého rádu

$$\tau_1(0) = \frac{2}{\omega}, \quad \tau_2(0) = \frac{2b_1}{b_0} \quad (2.12)$$

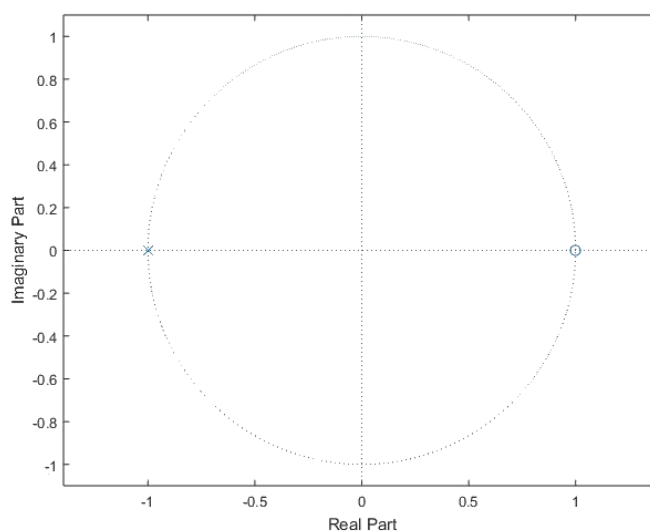
Prenosová funkcia fázovacieho článku prvého rádu je daná polynómom 1. stupňa. Prenosová funkcia má teda všeobecný tvar

$$K(s) = \frac{s - a}{s + a} \quad (2.13)$$

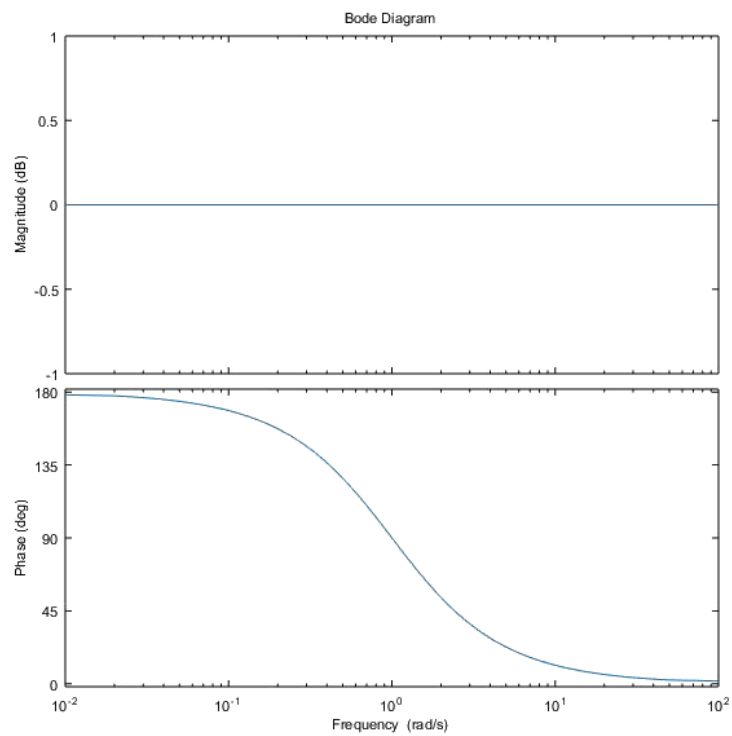
Fáza sa pri fázovacom článku 1. rádu mení od 0 do $-\pi$.

Prenosová funkcia fázovacieho článku 2. rádu je daná polynómom 2. stupňa, jej prenosová funkcia bude vyzerat'

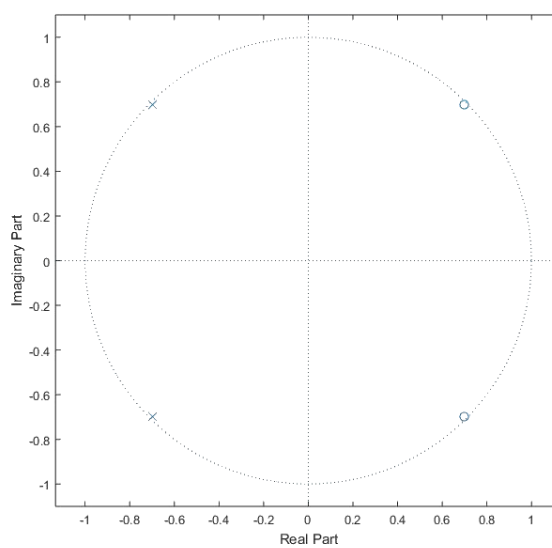
$$K(s) = \frac{s^2 - s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (2.14)$$



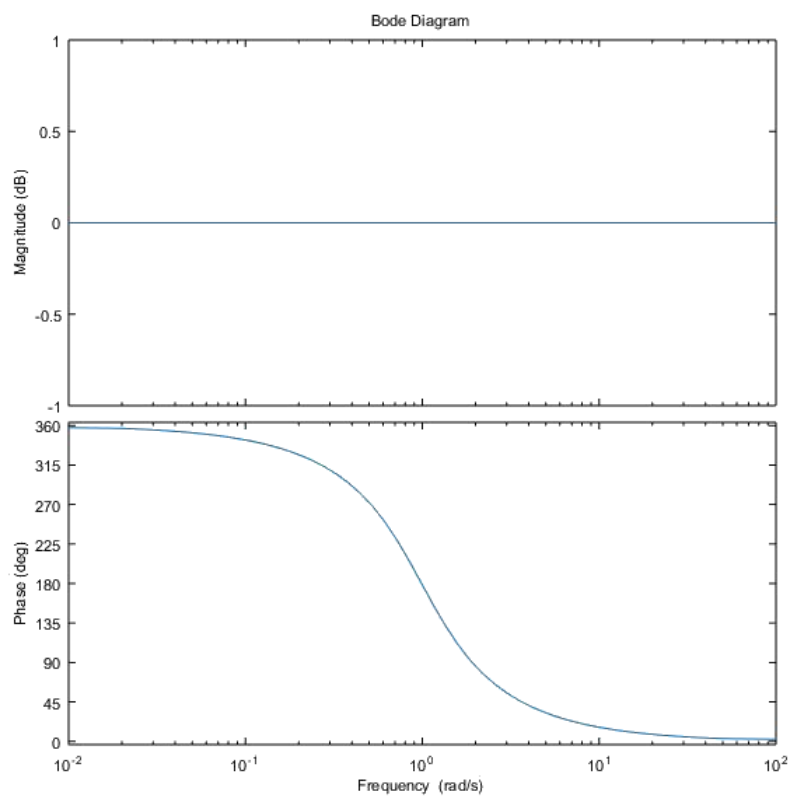
Obrázok 3: Teoretické rozloženie núl a pólov pri fázovacom článku 1. rádu



Obrázok 4 Teoretická fázová a frekvenčná charakteristika fázovacieho článku 1. rádu



Obrázok 5: Teoretické rozloženie núl a pólov pri fázovacom článku 2. rádu



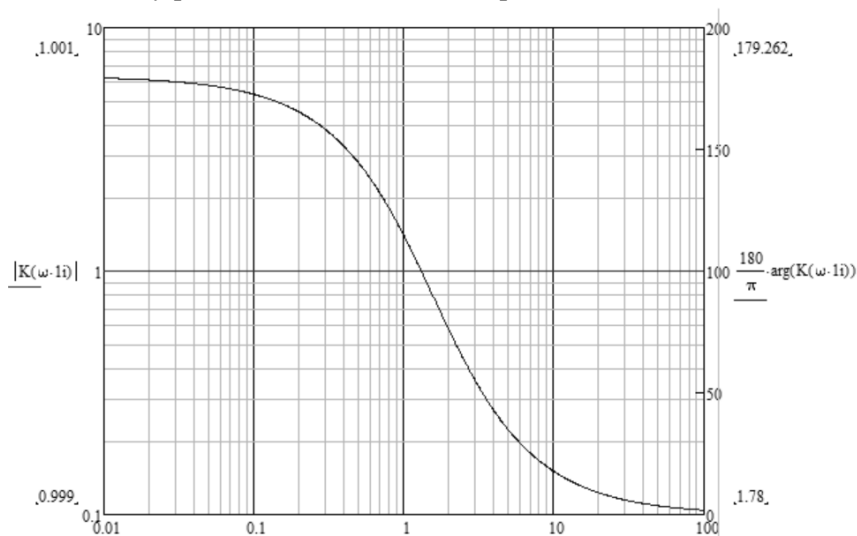
Obrázok 6: Teoretická fázová a frekvenčná charakteristika fázovacieho článku 2. rádu

3. Kaskádna syntéza

Ak chceme vytvoriť fázovací filter podľa tabuliek, využijeme kaskádu filtrov. V tabuľkách sú rôzne aproximácie, pre Butterworth sú koeficienty prepočítané na maximálne plochý modul prenosu v priepustnom pásme, u Čebyševa je to maximálna strmosť z priepustného do nepriepustného pásma. Každá aproximácia ma svoje špecifické hodnoty (v menovateli a čitateli), ktoré sa dajú prepočítať na význačný kmitočet a činiteľ akosti.

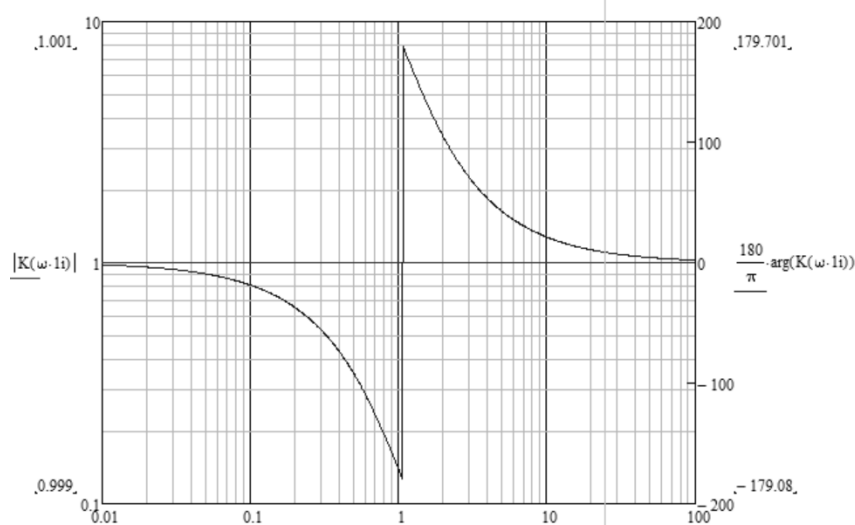
Kritérium pre fázovacie články je, aby až do medzného kmitočtu bolo skupinové oneskorenie maximálne konštantné. Fázová charakteristika musí mať maximálnu lineárnu deriváciu. V logaritmickom merítku to musí byť exponenciála smerom dole, ktorá platí len od DC do medzného kmitočtu kde sa to láme a derivácia potom padá k nule.

Frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 1. rádu pre $b_1 = 0,6436$



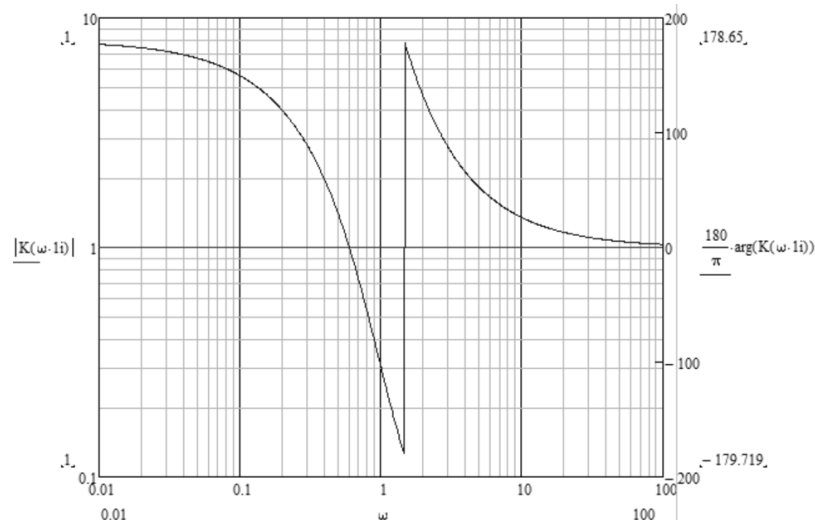
Obrázok 7: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 1. rádu, MathCad

Frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 2. rádu pre $b_1 = 1,6278$ a $b_2 = 0,8832$



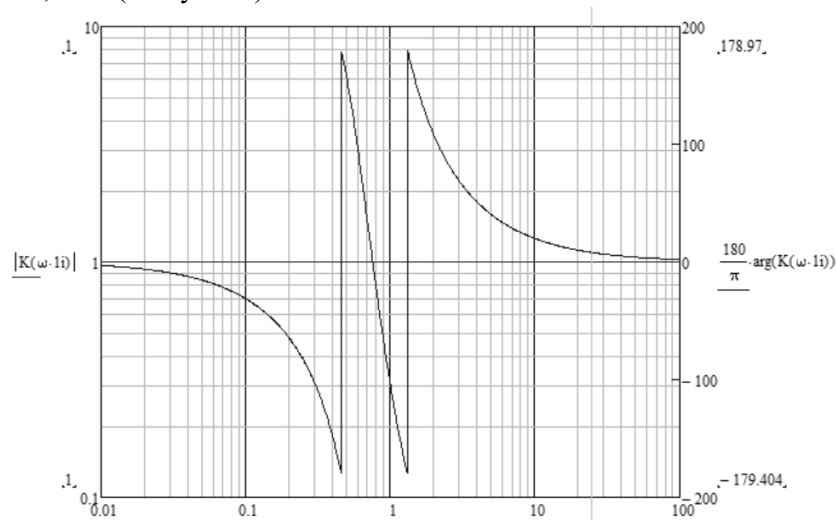
Obrázok 8: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 2. rádu, MathCad

Frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 3. rádu pre $b_1 = 1,1415$ (prvý blok), $b_1 = 1,5092$ a $b_2 = 1,0877$ (druhý blok)



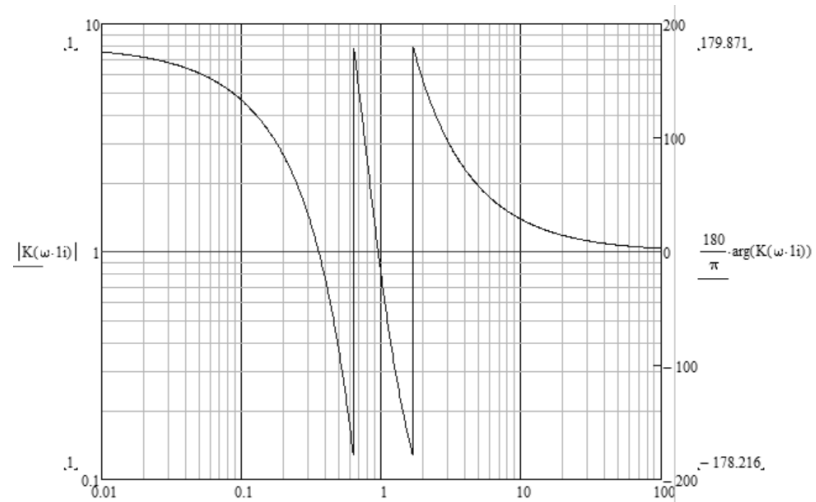
Obrázok 9: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 3. rádu, MathCad

Frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 4. rádu pre $b_1 = 2,337$ a $b_2 = 1,4878$ (prvý blok) a $b_1 = 1,3506$ a $b_2 = 1,1837$ (druhý blok)



Obrázok 10: : Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 4. rádu, MathCad

Frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 5. rádu pre $b_1 = 1,2974$ (prvý blok) a $b_1 = 2,2224$ a $b_2 = 1,5685$ (druhý blok), $b_1 = 1,2116$ a $b_2 = 1,233$ (druhý blok)



Obrázok 11: Normované frekvenčné charakteristiky pre fázovací článok 5. rádu, MathCad

4. Pasívne fázovacie filtre

4.1. Návrh fázovacích článkov RC 1.rádu

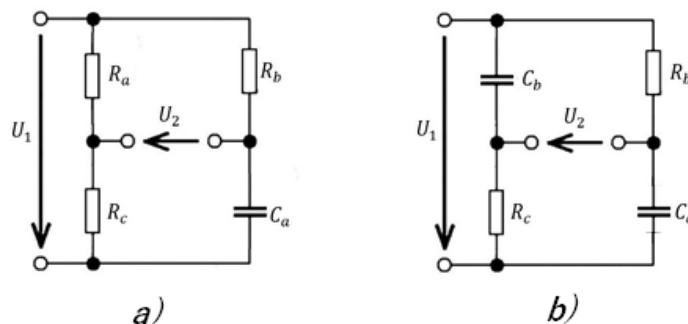
Pasívne obvody RC umožňujú realizovať fázovací obvod 1. rádu buď skutočne ako obvod 1. rádu s prenosom $K = 0,5$, alebo ako obvod 2. rádu s $K = 1$ a $Q = 0,5$, ktorého modulová a fázová charakteristika je za predpokladu zhodných R a C zhodná s modulovou a fázovou charakteristikou fázovacieho článku. Nevýhodou je plávajúce vstupné napätie, ktoré je nutné snímať obvodom s diferenčným vstupom. Návrh obvodu vychádza zo vzťahu

$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.1)$$

kde si zvolíme hodnotu C a hodnotu R dopočítame. U fázovacieho článku (a) je podmienka veľkosti $R_1 = R_2$.

Keďže je potrebné na výstupe fázovacieho článku použiť diferenčný oddeľovací zosilňovač a dva kondenzátory či dva rezistory s rovnakou hodnotou, je pre nízkofrekvenčnú oblasť vhodnejšie použiť v praxi zapojenie s OZ. Výpočet hodnôt R a C bude zhodný ako v predchádzajúcom prípade, no hodnoty R_1 môžu byť všeobecne ľubovoľné, no ak chceme minimalizovať offset a drift, bolo by vhodné volenie $R_1 = 2R$.

Prenos všeobecného fázovacieho článku vieme vyjadriť v tvare podľa vzorca (2.3), takže prenos na nízkych a vysokých kmitočtoch bude $K_0 = 1$, $K_\infty = -1$



Obrázok 7: Pasívne fázovacie články RC 1. rádu

Fázový posun bude dvojnásobný v porovnaní s obvodom s minimálnym argumentom

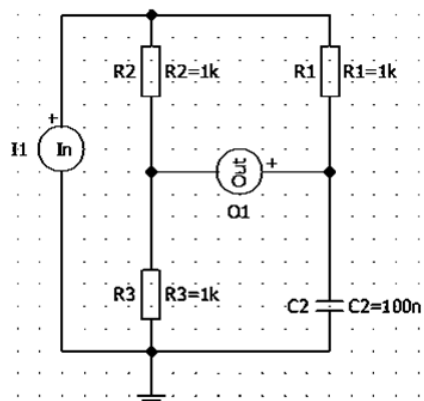
$$\varphi(\omega) = -2\arctan(\omega), \quad (4.2)$$

čo znamená že skupinové oneskorenie bude dvojnásobné. Počiatočná hodnota skupinového oneskorenia je

$$\tau_1(0) = \frac{b_1}{\omega}, \quad (4.3)$$

nulový bod a pól ležia symetricky na reálnej ose.

Realizácia simulácie obvodu a) v programe SNAP s hodnotami rezistorov $1k\Omega$ a kondenzátora $100nF$.



Obrázok 12 Zapojenie RC fázovacieho filtru 1. rádu v programe SNAP s jedným kondenzátorom

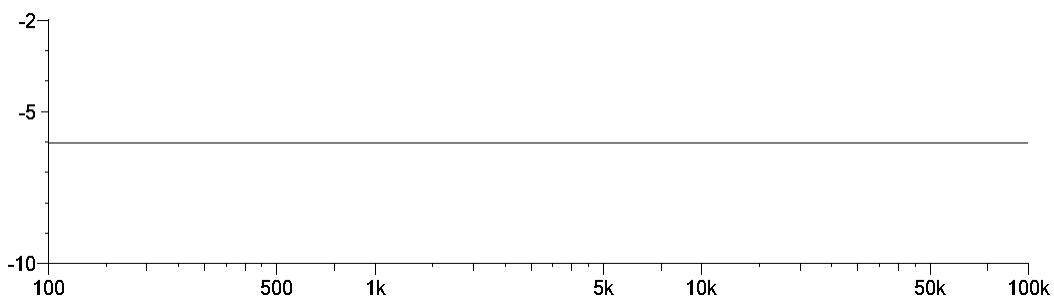
```
Full matrix created.
Entering symbolic analysis...
Symbolic analysis OK.
Entering numeric analysis...
Matrix analysis OK.

-----symbolic-----

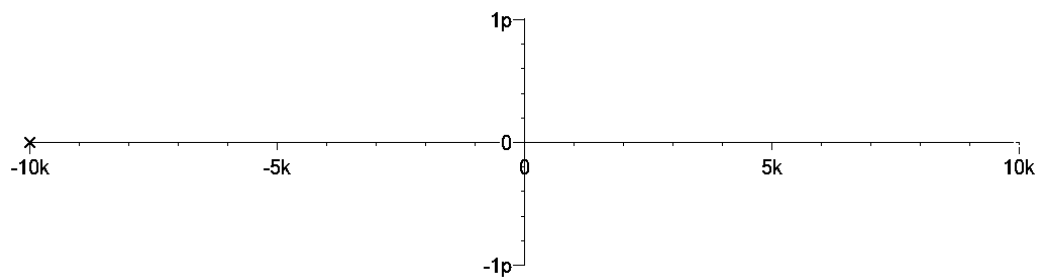
R2
~s*( R1×R3×C2 )
-----

R2 +R3
+s*( R1×C2×R2 +R1×R3×C2 )
```

Obrázok 13 Výsledok simulovaného obvodu v programe SNAP z Voltage gain (open output) analýzy



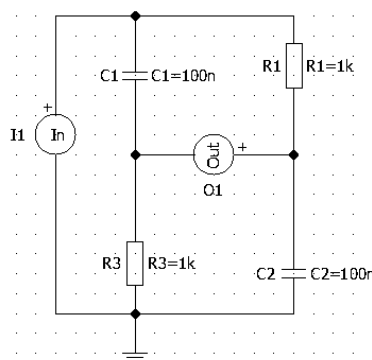
Obrázok 14 Simulácia pomocou programu SNAP v f-domain



Obrázok 15 Rozloženie núl a pólov, SNAP

Pri tomto rozložení pólov a núl dochádza ku kompenzácii núl a pólov, ktoré ležia na rovnakom kmитоčte.

Výsledky analýzy fázovacieho článku RC 1. rádu s dvoma kondenzátormi.

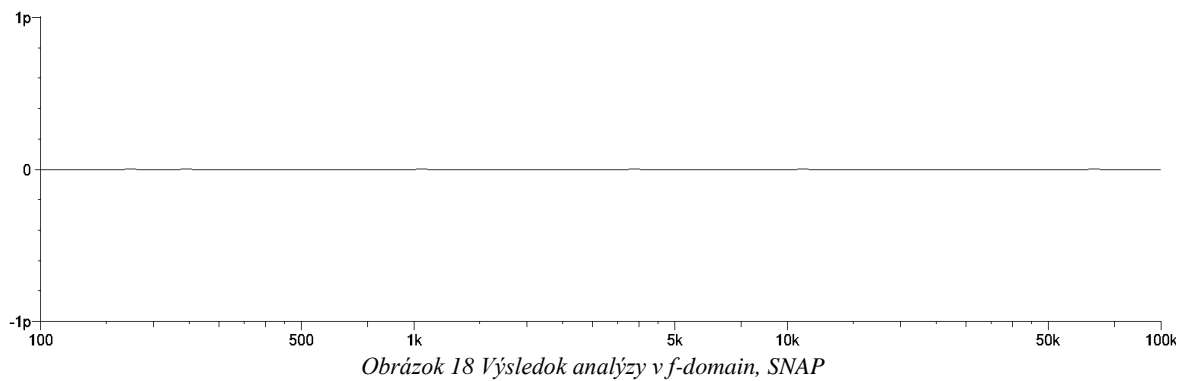


Obrázok 16 Zapojenie RC fázovacieho filtra 1. rádu s dvoma kondenzátormi

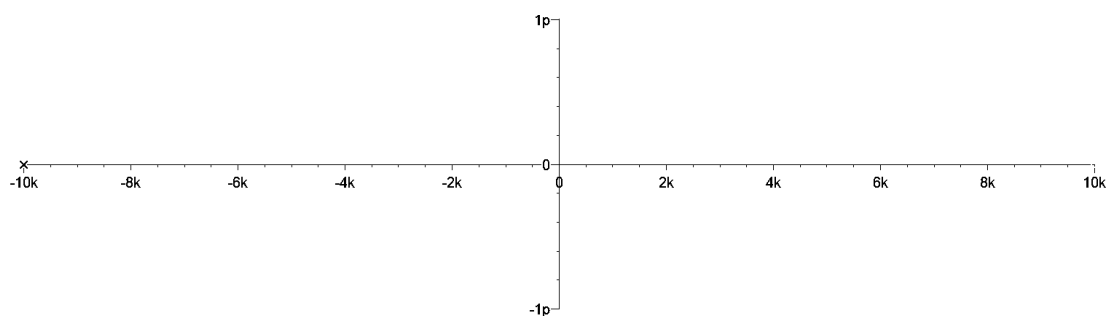
```
Full matrix created.
Entering symbolic analysis...
Symbolic analysis OK.
Entering numeric analysis...
Matrix analysis OK.

-----symbolic-----
1
-s^(2)*( R1*R3*C2*C1 )
-----
1
+s*( R3*C1 +R1*C2 )
+s^(2)*( R1*R3*C2*C1 )
```

Obrázok 17 Výsledok symbolickej analýzy (Voltage gain - open output), Snap

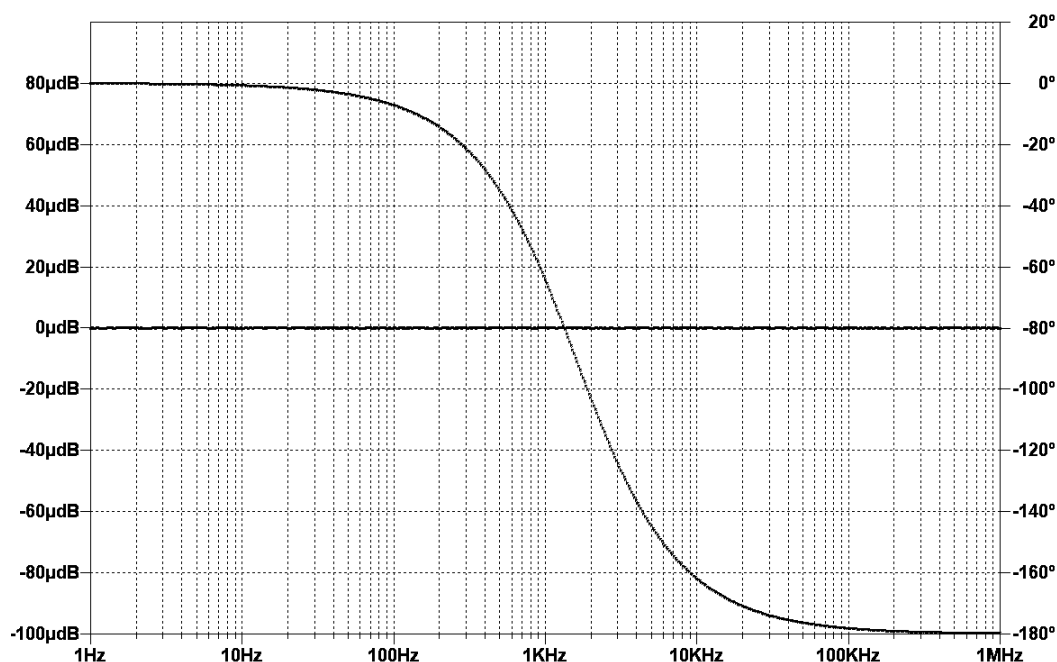


Obrázok 18 Výsledok analýzy v f-domain, SNAP



Obrázok 19 Rozloženie nulových bodov a pólov, SNAP

Pri tomto rozložení pólov a núl dochádza ku kompenzácii núl a pólov, ktoré ležia na rovnakom kmitočte.



Obrázok 20: Priebeh modulu a fázy fázovacieho článku RC 1. rádu, LTspice

4.2. Realizácia LRC fázovacích článkov

Pri impedančnom prispôbení sa chovajú ako ideálne prenosové vedenie, ktoré je možné ľubovoľne radiť do kaskád. Na vstupe a výstupe článku zaradujeme zaťažovacie rezistory, ktoré určujú aj činiteľ akosti článku a používajú sa k vyrovnávaniu skupinového oneskorenia LRC filtrov.

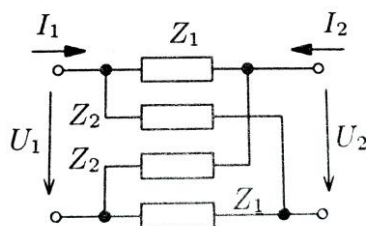


Obrázok 21 Fázovací článok s RLC

LRC fázovacie články sú vyjadrené rovnicami

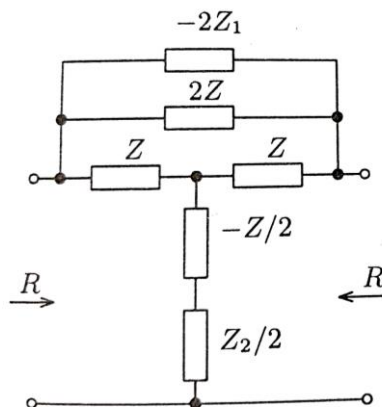
$$A(p) = \frac{1 - \frac{Z_1}{R}}{1 + \frac{Z_2}{R}} = \frac{1 - z_1(p)}{1 + z_2(p)}, \quad Z_0 = R, \quad z_1 z_2 = 1 \quad (4.4)$$

Kde $\frac{Z_1}{R} = z_1$ je normovaná (pomerná) impedancia pozdĺžnej vetvy a z_2 je normovaná impedancia priečnej vetvy krížového článku. Zapojenie krížového článku môžeme vidieť na obrázku nižšie



Obrázok 22 Zapojenie krížového článku, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1

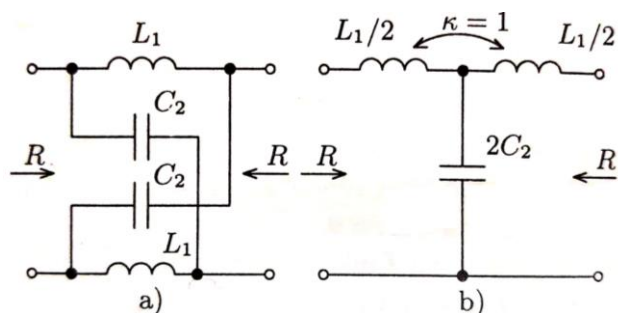
Pre praktickú realizáciu je všeobecný fázovací článok nevýhodný. Vieme ho realizovať pomocou v kaskáde zapojených prispôbených fázovacích článkov 1. a 2. rádu. Prenosová funkcia sa rozloží na súčin elementárnych dielčích prenosových funkcií, takže výslední zapojenie fázovacieho článku bude dané kaskádnym spojením prispôbených dielčích dvojbrán. Nevýhodou krížového článku je, že v zapojení potrebujeme dva páry rovnakých impedancií. K transformácii krížových článkov na tieto dvojbrany posluží všeobecné ekvivalentné zapojenie uvedené na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 23 Zapojenie odvodené z krížového článku, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1

Ekvivalent krížového článku vznikol z univerzálneho zapojenia na predchádzajúcom obrázku. Pre $Z = Z_1 = pL_1$, $Z_2 = \frac{1}{pC_2}$, takže sa vzájemne vykompenzovali induktory $2L_1$ a $-2L_1$. Trojpól ktorý vznikol z cievok L_1 , $-\frac{L_1}{2}$ a L_1 je nahradený cievkami s väzbou $K = 1$. Návrh fázovacieho článku vychádza z normovanej prenosovej funkcie. Vstupné parametre sú ω_0 a zvolená impedančná úroveň R . Pre zvolenie L_1 a C_2 použijeme vzťah:

$$L_1 = \frac{R}{\omega_0}, \quad C_2 = \frac{1}{\omega_0 R} \quad (4.5)$$



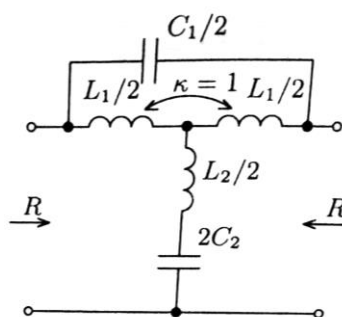
Obrázok 24 Ekvivalentné zapojenie RLC fázovacieho filtra 1. rádu a) a b), In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1

Pri návrhu fázovacieho článku 2. rádu základné zapojenie vychádza taktiež z krížového článku. Hodnoty L_1 , L_2 , C_1 , C_2 vychádzajú zo vzťahov, kde R sa volí a vstupnými parametrami sú ω_0

$$L_1 = \frac{R}{\omega_0 Q}, \quad L_2 = \frac{RQ}{\omega_0}, \quad C_1 = \frac{Q}{\omega_0 R}, \quad C_2 = \frac{1}{\omega_0 QR} \quad (4.6)$$

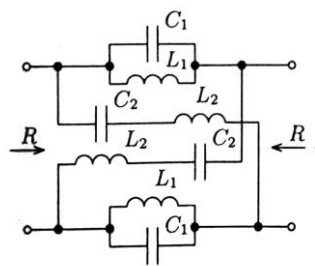
Nesymetrické zapojenie je výhodné, no má činiteľ väzby $k = 1$. Pri postupe návrhu fázovacieho článku druhého rádu s LRC najprv definujeme činiteľ väzby k , ku ktorému dopočítame hodnoty obvodových prvkov, čo je veľmi komplikované. Pre konkrétne k navrhujeme ďalšie prvky, čo vedie k doplnkovej cievky v sérii s kondenzátorom. Pri tomto zapojení druhého rádu je možné realizovať nesymetrické zapojenie bez použitia vzájomnej indukčnosti.

Ak chceme, aby $Q < 1$, tak potom fázovací článok realizujeme ekvivalentným krížovým článkom na nasledujúcom obrázku



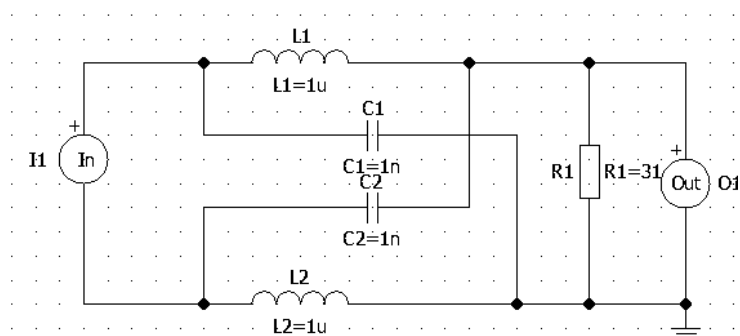
Obrázok 25 Fázovací článok RLC s $Q < 1$, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1

Ak chceme, aby $Q > 1$, tak potom volíme fázovací článok realizujeme ekvivalentným krížovým článkom na nasledujúcom obrázku



Obrázok 26 Fázovací článok RLC s $Q > 1$, In: DAVÍDEK V., LAIPERT M., VLČEK M., Analogové a číslicové filtry, Praha 2006, ISBN 80-01-03026-1

Simulácia fázovacieho článku RLC prvého rádu v prostredí programu SNAP



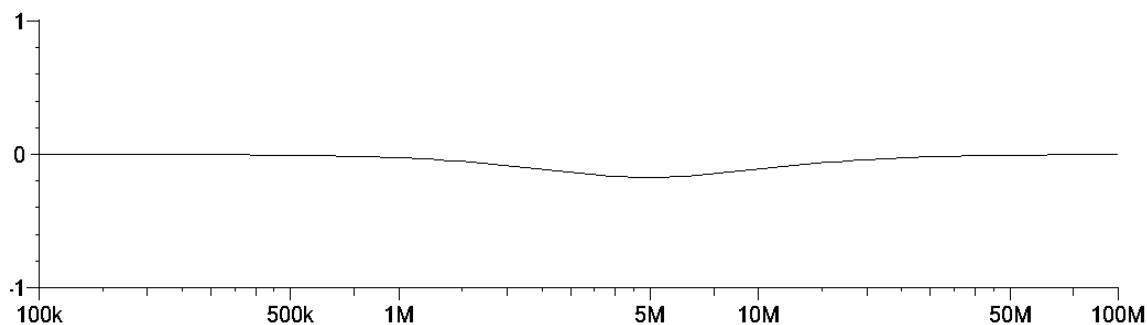
Obrázok 27: Fázovací filter RLC 1. rádu, SNAP

```

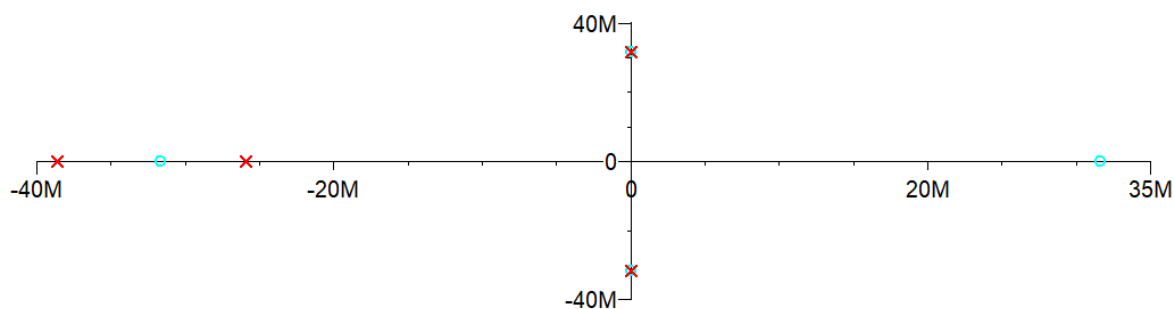
-----symbolic-----
R1
-s^(4)*( C1*C2*L1*L2*R1 )|
-----
R1
+s*( L2 +L1 )
+s^(2)*( C1*L2*R1 +C2*L1*R1 )
+s^(3)*( C2*L1*L2 +C1*L1*L2 )
+s^(4)*( C1*C2*L1*L2*R1 )

```

Obrázok 28: Symbolická analýza fázovacieho RLC filtra 1. rádu, snap

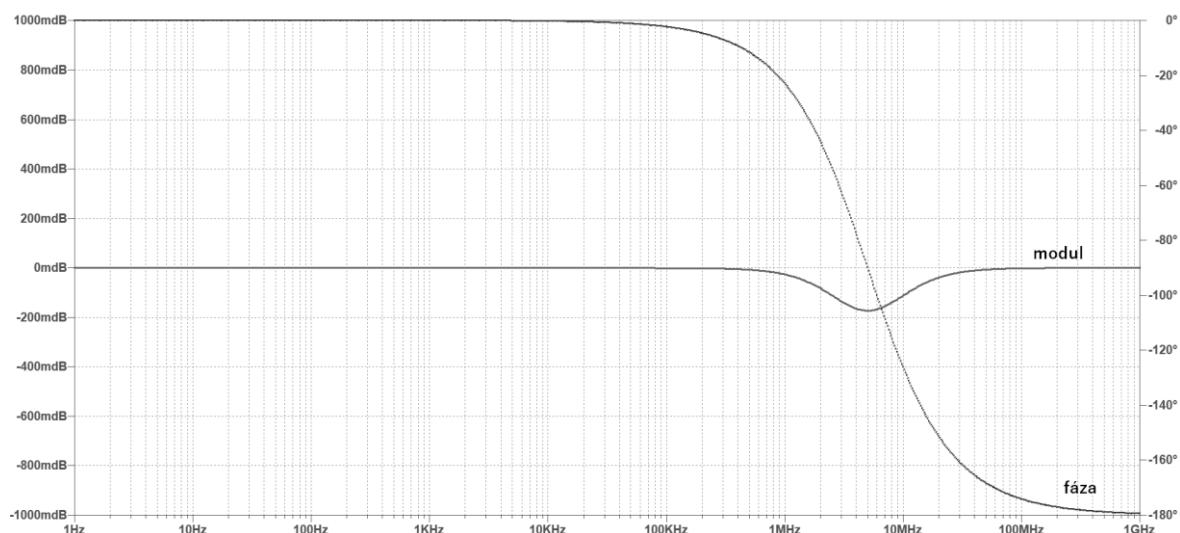


Obrázok 29: Analýza RLC fázovacieho článku 1. rádu v f -domain, SNAP



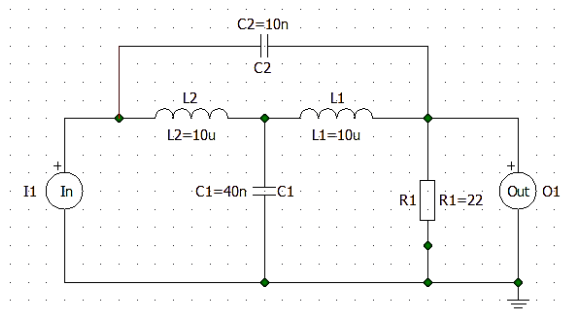
Obrázok 30: Rozloženie nulových bodov a pólov pre RLC fázovací článok 1. rádu

Nuly a póly sa nekompenzujú, čo je zapríčinené numerickými hodnotami indukčností a kapacít, ktoré nie sú zvolené presne ale len približne. Toto je dôvod, prečo sa LC fázovacie články v praxi nepoužívajú, pretože je pri nich potrebná presná kompenzácia, čo cievky nikdy presnú hodnotu nemajú. Tak isto sú tieto články veľmi citlivé, napríklad ak cievka zmení starnutím alebo zmenou teploty svoju indukčnosť, nuly a póly sa rozhodia a frekvenčné charakteristiky sú deformované. Preto je výhodnejšie pracovať s aktívnymi prvkami.



Obrázok 31: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre RLC fázovací článok 1. rádu, LTSpice

Simulácia fázovacieho článku RLC druhého rádu v prostredí programu SNAP.



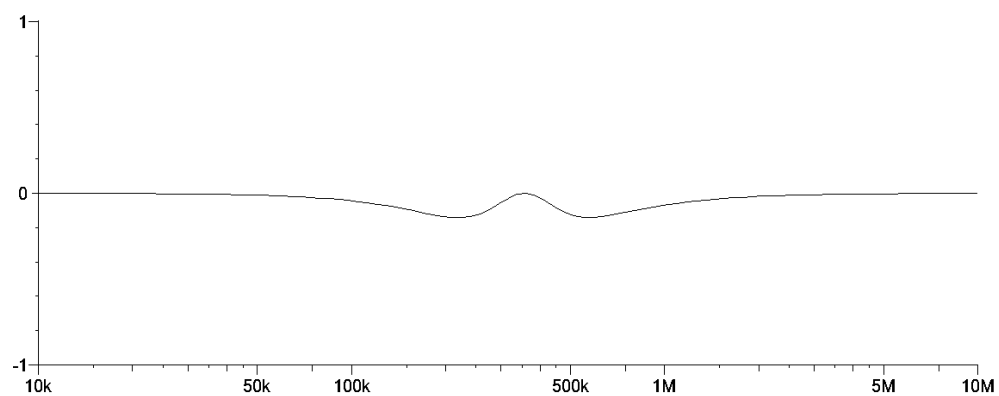
Obrázok 32: RLC fázovací článok 2. rádu, SNAP

```

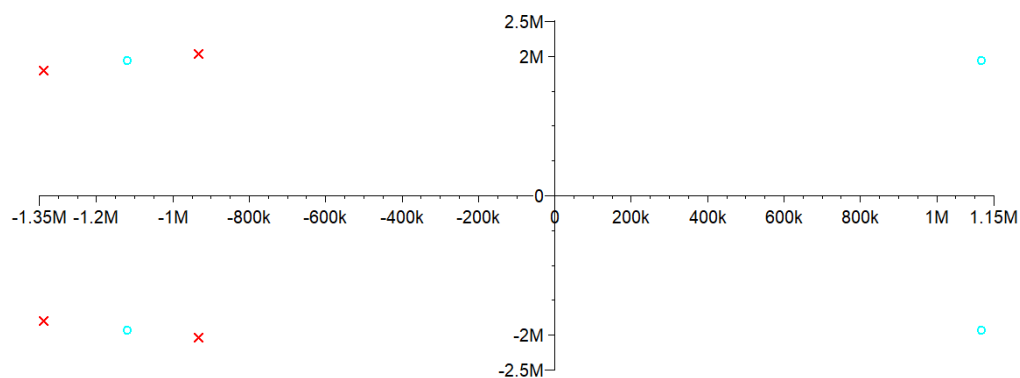
-----symbolic-----
R1
+s^(2)*( C2*L1*R1 +C2*L2*R1 )
+s^(4)*( C2*C1*L1*L2*R1 )
-----
R1
+s*( L2 +L1 )
+s^(2)*( C2*L1*R1 +C2*L2*R1 +C1*L2*R1 )
+s^(3)*( C1*L1*L2 )
+s^(4)*( C2*C1*L1*L2*R1 )

```

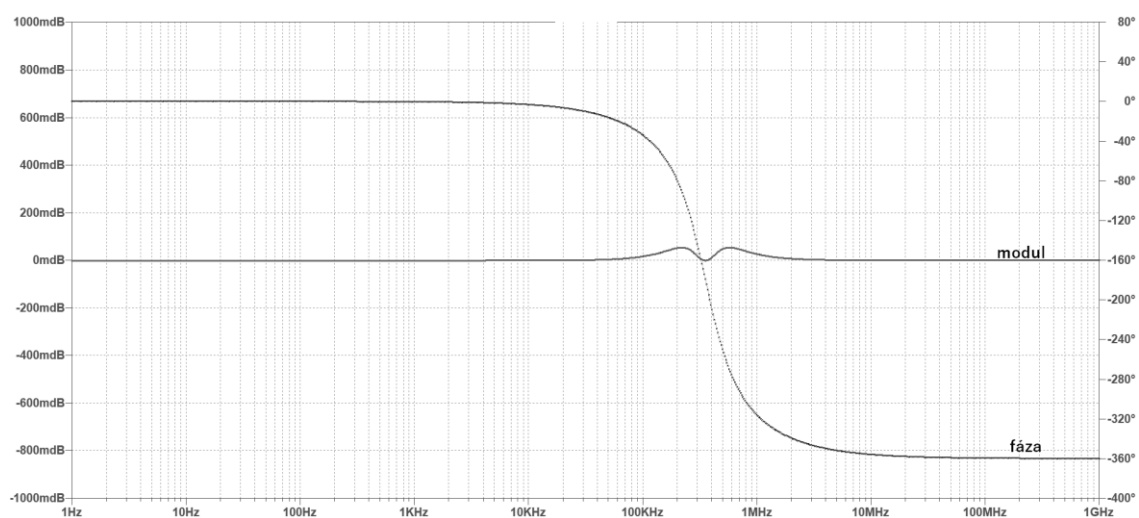
Obrázok 33: Symbolická analýza RLC fázovacieho filtru 2. rádu, SNAP



Obrázok 34: Analýza RLC fázovacieho filtru 2. rádu v f-domain, SNAP



Obrázok 35: Rozloženie núl a pólov RLC fázovacieho filtru 2. rádu, SNAP



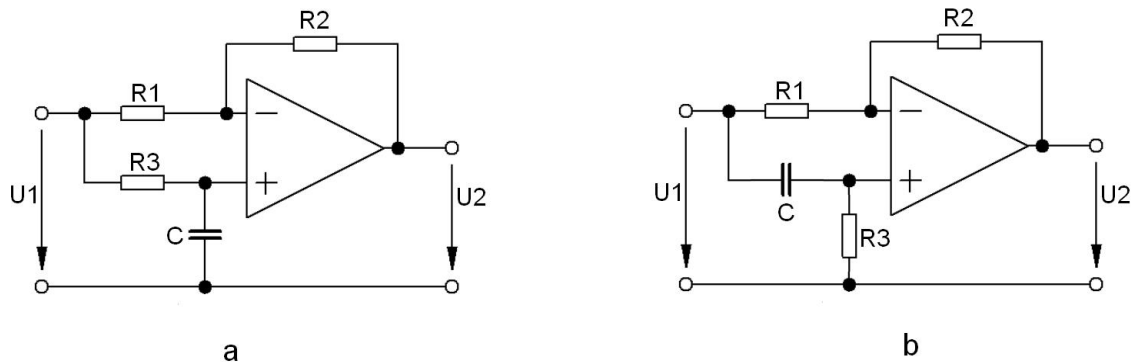
Obrázok 36: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre RLC fázovací článok 2. rádu, LTspice

5. Aktívne fázovacie články

5.1. Aktívny fázovací článok 1. rádu

Dve vyššie spomenuté zapojenia RC fázovacích článkov 1. rádu sa v praxi nepoužívajú, kvôli diferenciálnemu (plávajúceho) výstupu, túto nevýhodu odstraňuje použitie zapojenia s operačným zosilňovačom.

V tomto príklade obvodu môžeme použiť operačný zosilňovač 741 [16]. Operačný zosilňovač 741, má tzv. power dissipation 500 mW, vstupné napätie +/- 15 V a napájacie napätie +/- 18 voltov. Hodnoty však závisia od skutočného použitého IC, takže treba kontrolovať datasheet. 741C je priamou náhradnou náhradou za 709C, LM201, MC1439 a 748 vo väčšine aplikácií.



Obrázok 37: Fázovací článok 1. rádu s aktívnym prvkom

Ich symbolický tvar prenosových funkcií je pre

$$a) \quad K(s) = \frac{-R_1 R_3 C_s + R_2}{R_1 R_3 C_s + R_1} \quad (5.1)$$

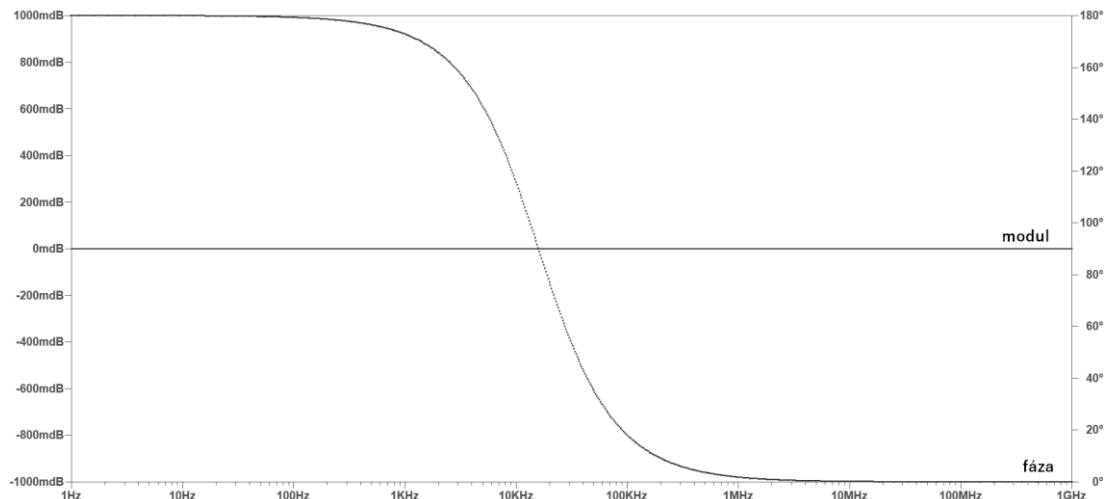
$$b) \quad K(s) = \frac{-R_2 R_3 C_s + R_1}{R_1 R_3 C_s + R_1} \quad (5.2)$$

Pre obvod a) platia podmienky že rezistory R_1 a R_2 musia mať rovnaké hodnoty a frekvencia obvodu je definovaná :

$$f = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (5.3)$$

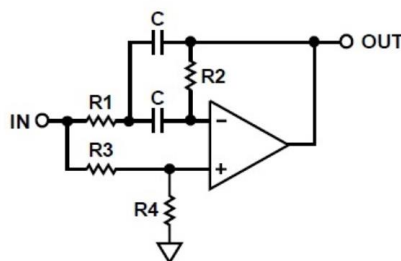
$$R_2 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega, C = 10 \text{ nF} \quad (5.4)$$

Bežné hodnoty rezistorov sa môžu pohybovať medzi $1 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega$.



Obrázok 38: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre aktívny fázovací článok 1. rádu, LTspice

5.2. Aktívny fázovací článok 2. rádu



Obrázok 39: Fázovací článok 2. rádu s aktívnym prvkom [online]. 25.11.2019, Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/All-Pass-Filter-basics-and-types.html>

Prenosová funkcia článku:

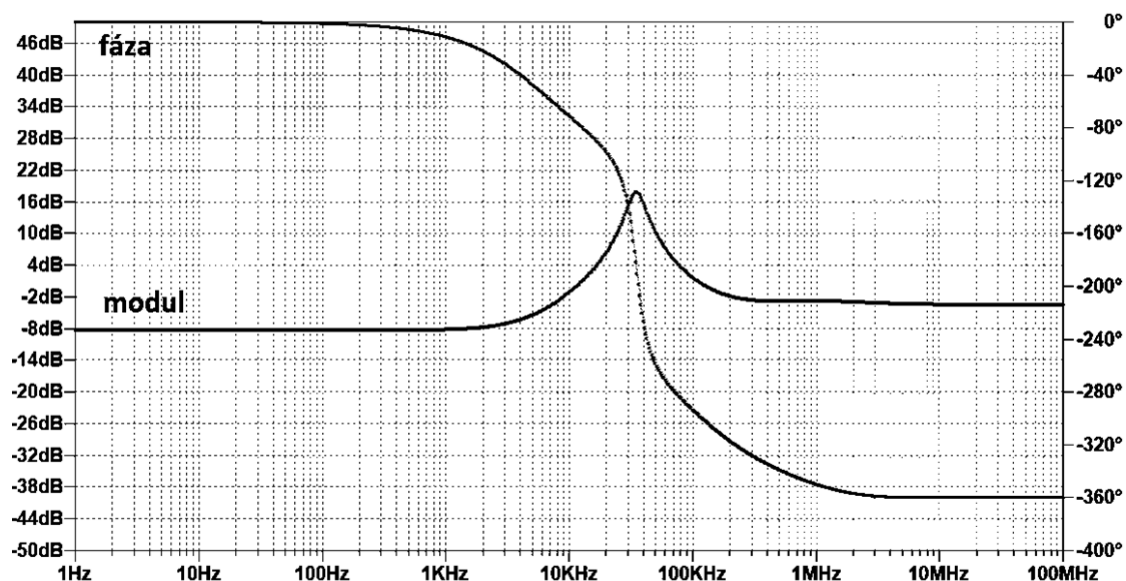
$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{s^2 - s\left(\frac{2}{CR2}\right) + \frac{1}{R1R2C^2}}{s^2 + s\left(\frac{2}{CR2}\right) + \frac{1}{R1R2C^2}} \quad (5.5)$$

Konštanty pre výpočet

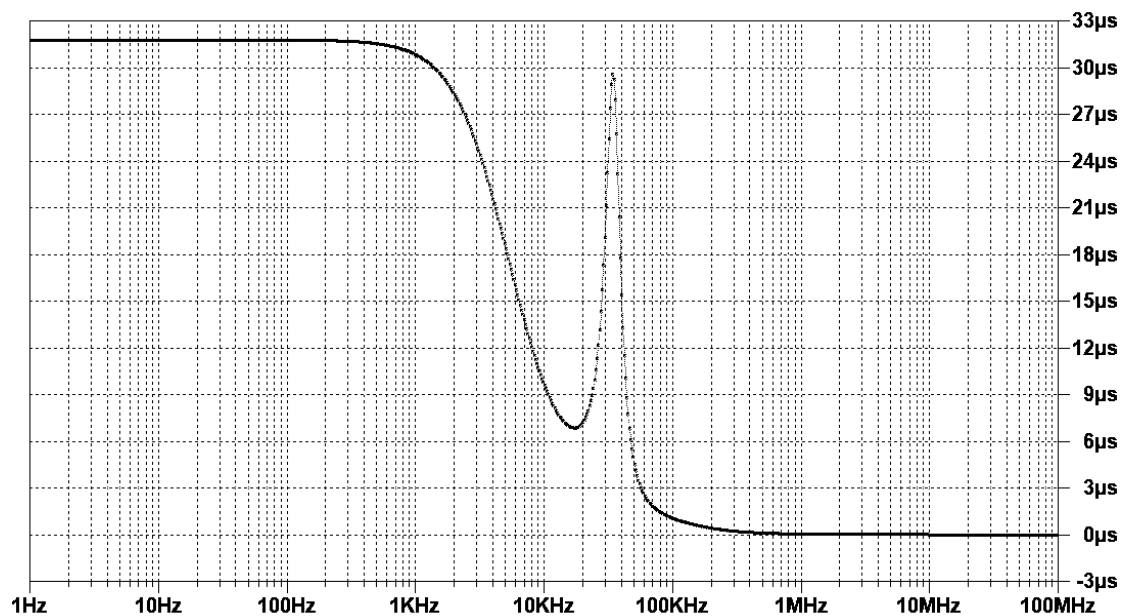
$$k = 2\pi f_c C, \quad R2 = \frac{2Q}{k}, \quad R1 = \frac{1}{2kQ}, \quad R3 = R1, \quad R4 = Q^2 R3 \quad (5.6)$$

K dizajnu obvodu potrebujem zadať f_c a C . Následne dopočítam ostatné prvky. K simulácii bol využitý operačný zosilňovač TL071 [16] s napájacím napätím $V_{cc} = \pm 10V$.

$$f_c = 10kHz, C = 10nF, k = 6,28 * 10^{-4}, R2 = 6366\Omega, R1 = R3 = 387\Omega, R4 = 1581\Omega$$



Obrázok 40: Závislosť modulu a fázy napäťového prenosu na frekvencii pre aktívny fázovací článok 2. rádu, LTspice

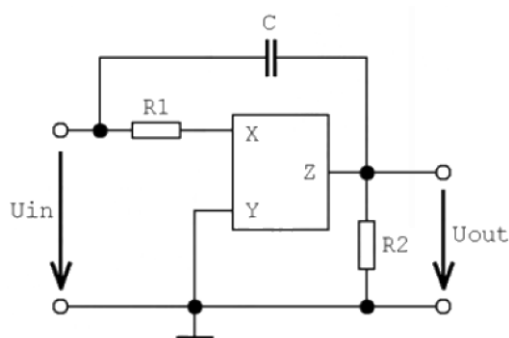


Obrázok 41: Skupinové oneskorenie pre aktívny fázovací článok 2. rádu, LTspice

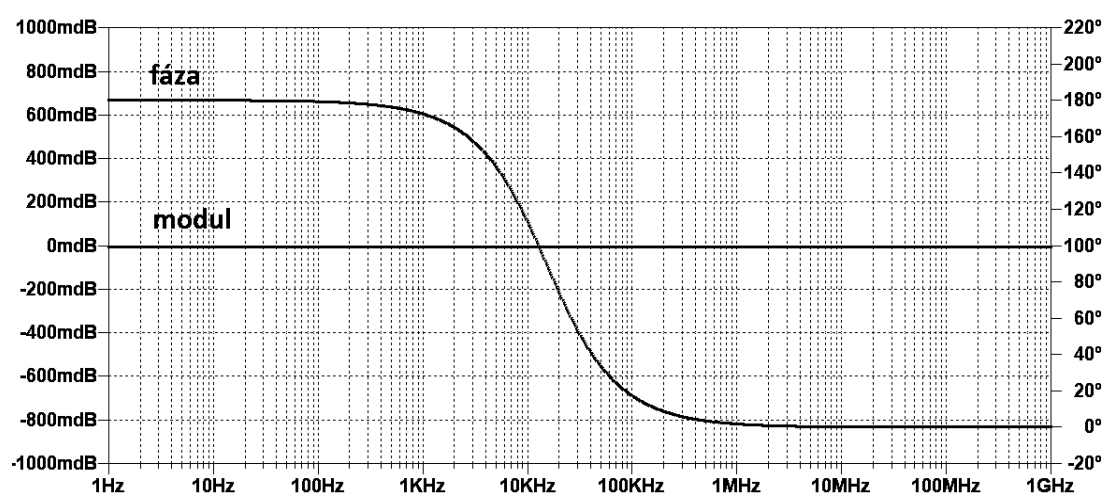
5.3. Fázovací článok prvého rádu s CCII+

Návrh fázovacieho článku pomocou pozitívneho prúdového konveju 2. generácie (CCII+). Zvolil som obvod AD844 od výrobcu Analog Devices [15], ktorý predstavuje transimpedačný zosilňovač. Parametre prvkov pre zapojenie som zvolil nasledovne $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$ a $C = 10\text{n}$. Napájanie bolo zvolené $V_{cc}/-V_{cc} = \pm 10\text{V}$. Celkový prenos je definovaný vzťahom:

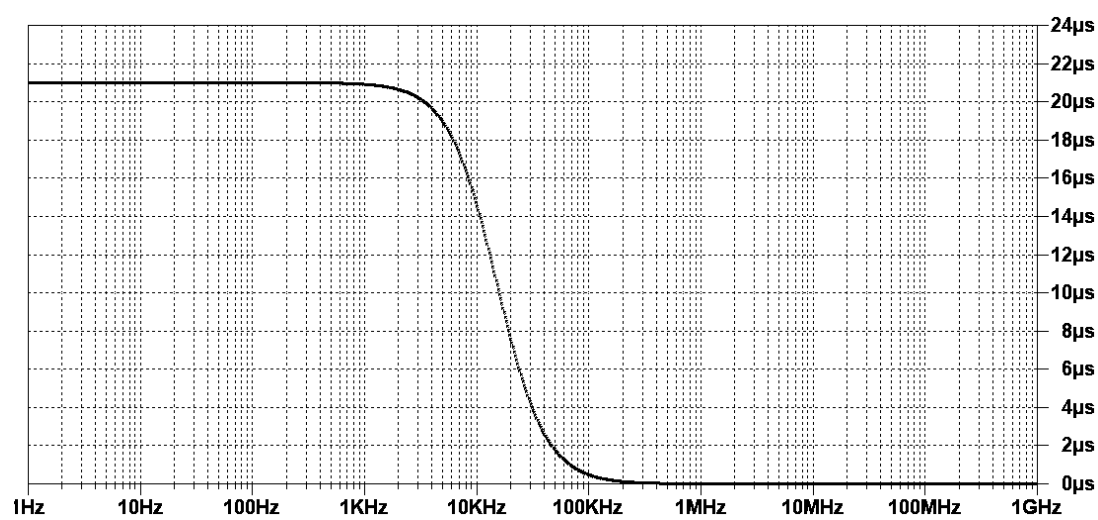
$$K(s) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-R_2 + s(R_2 C R_1)}{R_1 + s(R_2 C R_1)} \quad (5.7)$$



Obrázok 42: Zapojenie fázovacieho článku s CCII+ 1.rádu, In: PETRŽELA, J. Elektrické filtry. Online přednášky. FEKT VUT v Brně, 2011



Obrázok 43: Priebeh fázy a modulu Fázovacieho článku s CCII+ 1.rádu, spice



Obrázok 44: Skupinové oneskorenie fáz. článku s CCII+ 1.rádu, spice

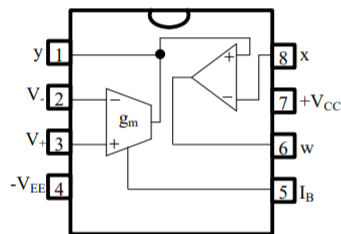
5.4. Fázovací článok prvého rádu s OTA

V tomto zapojení som použil integrovaný obvod LT1228 vyrábaný firmou Linear Technology Corporation [14]. LT1228 pozostáva z dvoch aktívnych prvkov, operačného transkondukčného zosilňovača (OTA) a zo zosilňovača s prúdovou spätnou väzbou (CFA). Transkonduktancia (g_m) je elektronicky kontrolovaná a hodnotu g_m môžeme nastaviť na výstupe I_{set} . Interná konfigurácia je popísaná na Obrázku. Obvod je popísaný maticou:

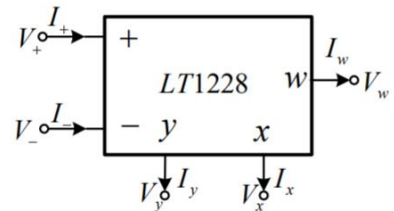
$$I_z = g_m(V_+ - V_-); V_x = V_z; V_w = I_x R_T, \quad (5.8)$$

kde R_T predstavuje transrezistanciu LT1228 a je nekonečná v ideálnom prípade. Transkonduktancia (gain) je nastavovaný pomocou I_B . Volil som $I_B = 10 \mu A$, $R = 1k \Omega$ a $C = 1nF$. Napájacie napätie - $V_{EE}/+V_{CC} = \pm 5V$.

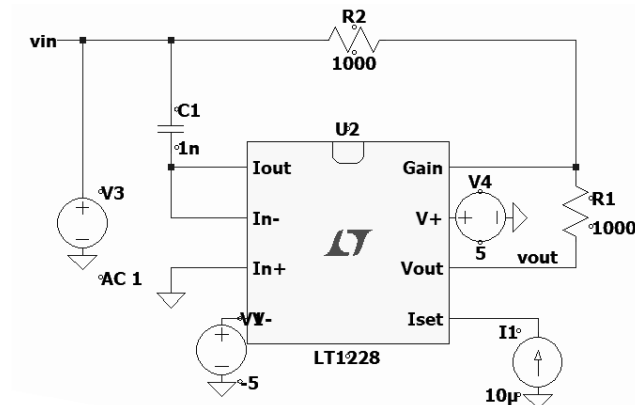
$$g_m = 10I_B \quad (5.9)$$



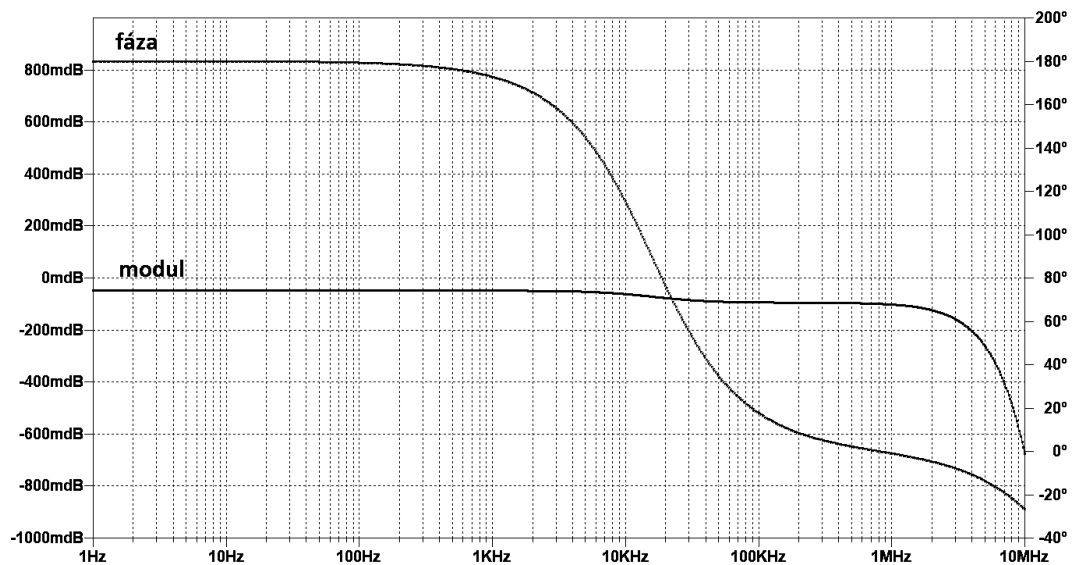
Obrázok 45: konfigurácia pinov LT1228



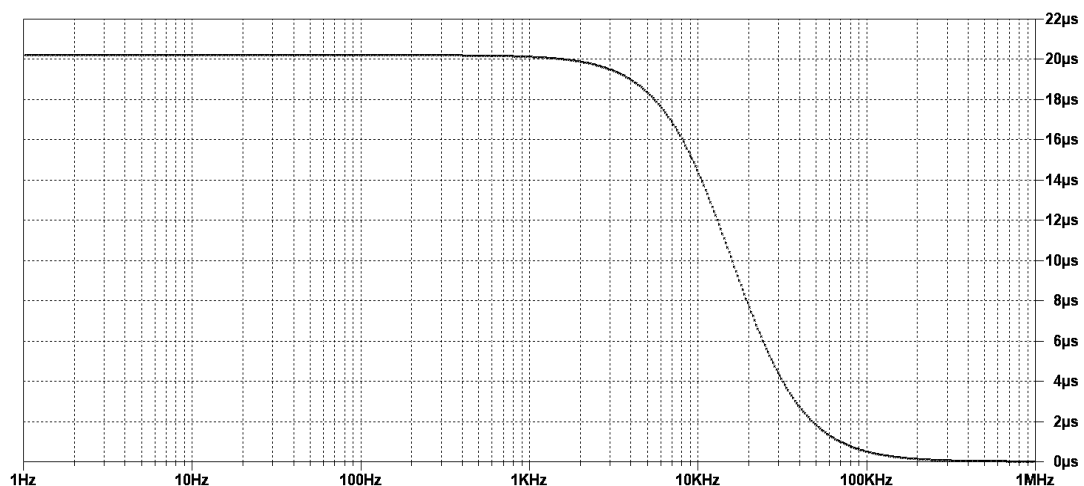
Obrázok 46: Schematická značka LT1228



Obrázok 47: Zapojenie simulovaného fázovacieho filtra 1. rádu s OTA, spice



Obrázok 48: Pribeh modulu a fázy fázovacieho článku 1. rádu s OTA, spice



Obrázok 49: Skupinové oneskorenie fázovacieho článku 1. rádu s OTA, spice

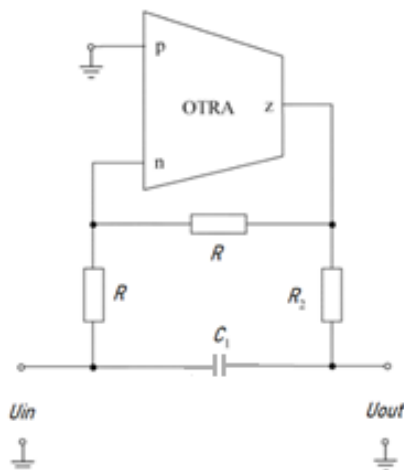
Prenos tohto článku je všeobecne vyjadrený vzťahom:

$$K(s) = \frac{v_o}{v_i} = - \left(\frac{g_m - sC}{g_m + sC} \right) \quad (5.10)$$

5.5. Transimpedančný fázovací článok prvého rádu so zosilňovačom OTRA

Používa jeden OTRA (operational transresistance amplifier) a pár pasívnych komponentov. Obvod je senzitivný na parazitné vstupné kapacitancie a vstupné rezistancie, kvôli vnútorne uzemneným terminálom OTRA. Poskytuje alternatívu k realizácii fázových obvodov pre analógový signal processing, pričom realizuje current-to-voltage konverziu.

Vstup aj výstup svoriek je charakterizovaný nízkou impedanciou. (R_m) transrezistencia v mojom prípade bola volená $R_m = 1K\Omega$

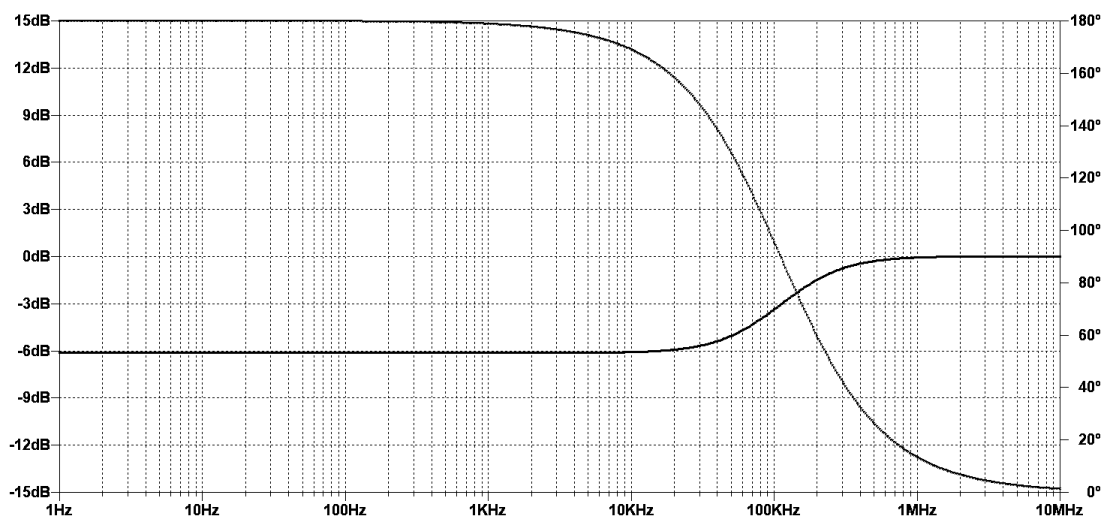


Obrázok 50: Konfigurácia fázového článku s členom OTRA

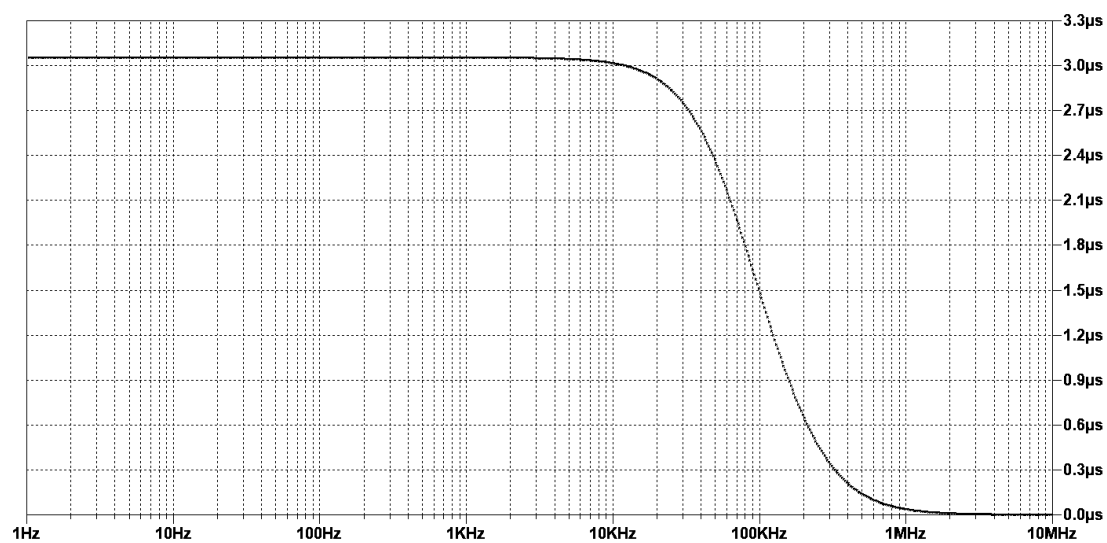
Napät'ový prenos vychádza:

$$K(s) = \frac{s - \frac{1}{C_1 R_2}}{s + \frac{1}{C_1 R_2}} \quad (5.11)$$

Pri simulácii obvodu boli použité hodnoty súčiastok $R = R_2 = R_3 = 1\text{K}\Omega$ a $C_1 = 1\text{nF}$. Hodnoty napájacieho napätia som volil $V_{DD} = 10\text{V}$ a $V_{SS} = -10\text{V}$.



Obrázok 51: Fázovací článok s prvkom OTRA, priebeh fázy a modulu, LTspice



Obrázok 52: Skupinové oneskorenie fázovacieho článku s OTRA, LTspice

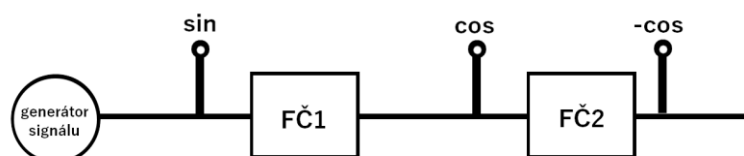
6. Laboratórny prípravok

1. Meranie v prvom bode bude obsahovať jeden pasívny fázovací článok 1. rádu, napríklad zapojenie na Obrázku 7a), kde je potrebné odmerať kmitočtové charakteristiky modulu a fázy (na osciloskope) so špecifikáciou od akej f_{start} do f_{stop} . Určíme ju od 1Hz do 1MHz. Tak isto kde merať husto, kde riedko, aby sa zistilo kde má fáza najväčšiu deriváciu (najstrmšiu zmenu). Študenti po zmeraní vynesú grafy od ruky. Ďalší bod bude meranie LC fázovacieho článku. Postup pri meraní bude rovnaký.

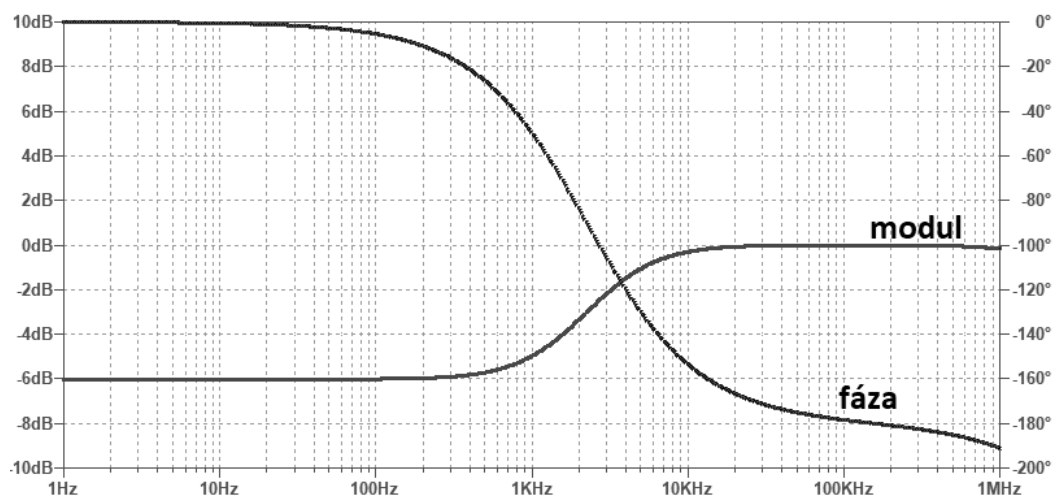
2. Meranie v druhom bode bude obsahovať aktívny fázovací filter 1. rádu s OZ, kde sa bude merať priebeh fázy (osciloskop) a modulu. Meranie bude obsahovať taktiež domácu prípravu, kde bude potrebné vypočítať význačný kmitočet $f = \frac{1}{2\pi RC}$. Použité zapojenie bude z Obrázku 37a), kvôli kondenzátoru pripojeného na zem, čo bude ľahšie pre jeho menenie v prípravku. Meranie bude prebiehať od $f_{\text{start}}=1\text{Hz}$ do $f_{\text{stop}}=1\text{MHz}$. Študenti po zmeraní vynesú grafy od ruky.

3. Ďalší bod merania bude pozostávať zo zapojenia fázovacieho článku s aktívnym prvkom CCII+ pomocou integrovaného obvodu AD844. Použité zapojenie bude z Obrázku 37. Merať sa bude priebeh fázy a modulu ako v predošlých dvoch bodoch. Študenti po zmeraní vynesú svoje namerané hodnoty do grafov.

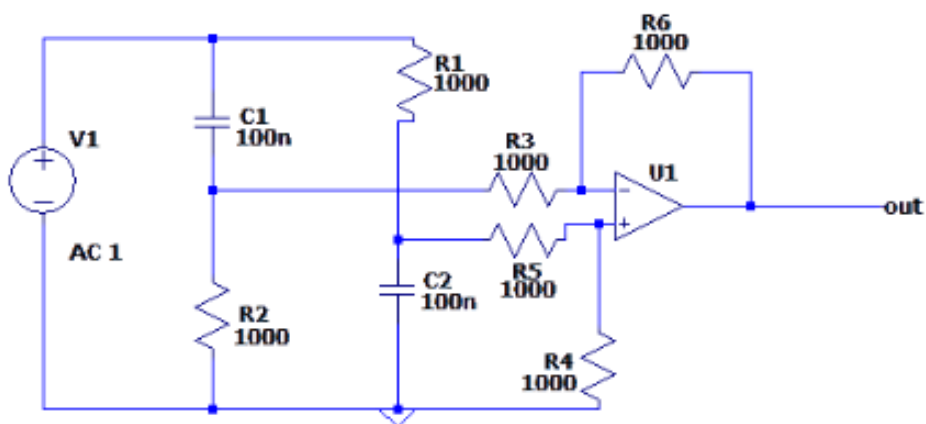
4. Tretia časť merania bude pozostávať zo zapojenia fázovacích článkov v kaskáde za sebou v časovej oblasti, to znamená demonštráciu prechodu predom definovaného signálu cez fázovací článok. Na vstup prípravku pripojíme generátor s amplitúdou $amp = 1V_{\text{ef}}$ a sínusovým harmonickým priebehom, prevedieme ho cez FČ1 a FČ2 a následne cez meracie body vykreslíme priebehy na osciloskope. Generátor bude nastavený vhodne na medzný kmitočet, tj. 1kHz aby sme dosiahli presný posuv fázy o 90° .



Obrázok 53: Návrh merania 4. úlohy v laboratórnom prípravku



Obrázok 54: RC pasívny fázovací článok s rozdielovým OZ (simulácia v LTspice – modul + fáza) – návrh pre prípravok



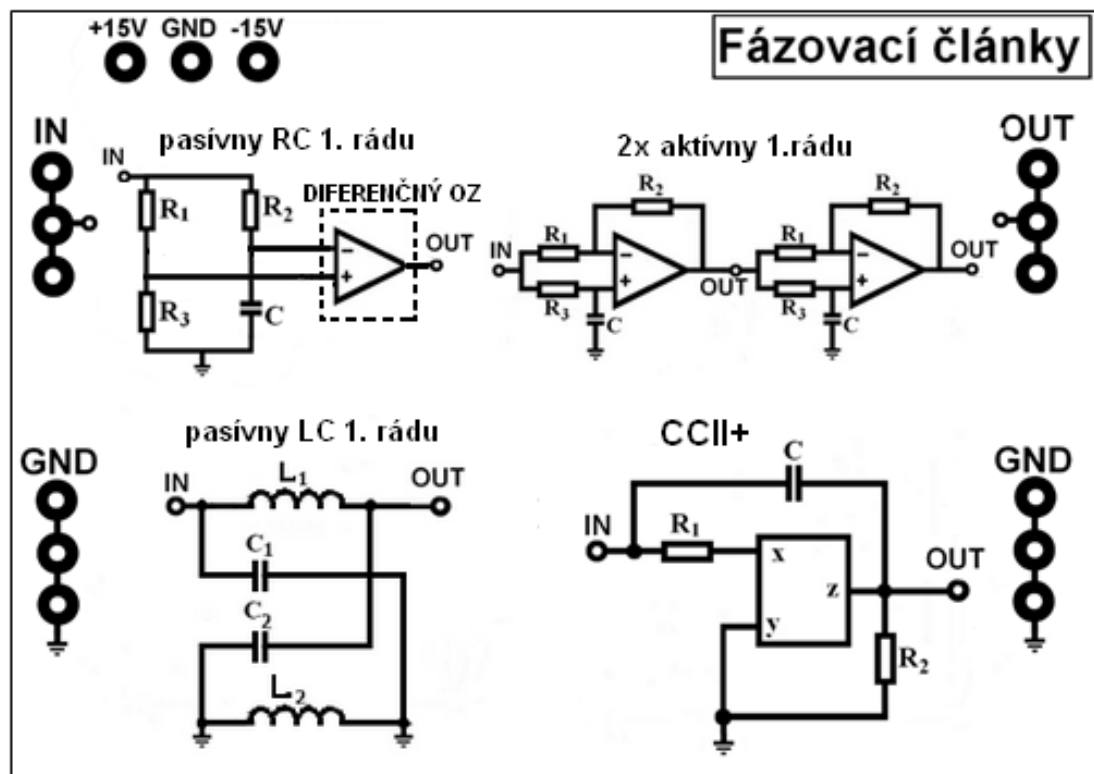
Obrázok 55: Simulovaný obvod RC pasívneho fázovacieho článku v LTspice

7. Návrh potlače laboratórneho prípravku

Na nasledujúcom obrázku je merací prípravok na ktorom sú 2 pasívne fázovacie filtre a 2 aktívne fázovacie filtre.

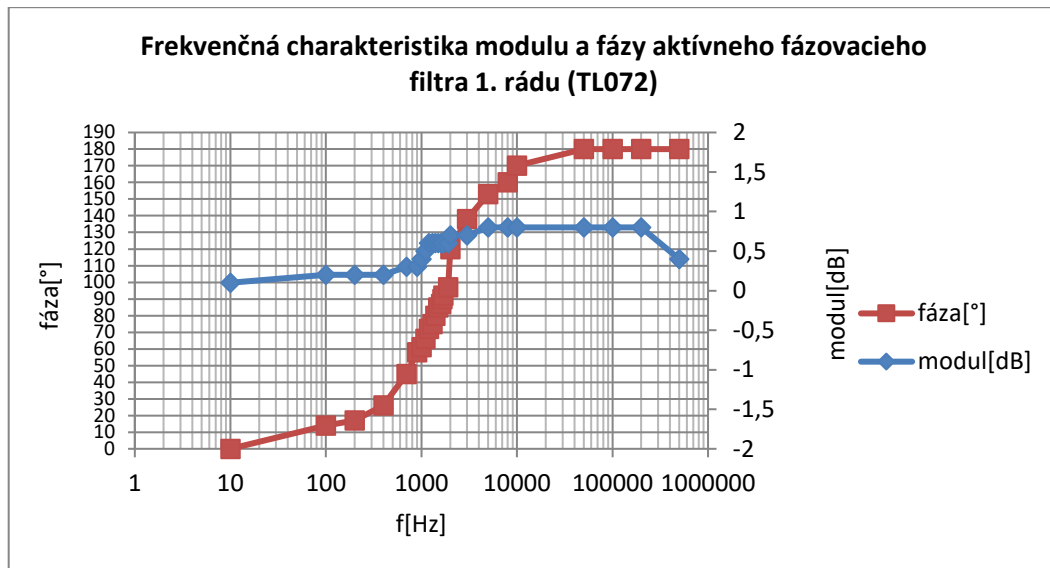
Na vrchu prípravku sú diery pre symetrický napájací zdroj používaný v laboratóriách $\pm 15V$.

Študent pripojí meracie prístroje na IN/OUT a GND veľké diery meracieho prípravku, na ktoré následne malými prepojovacími konektormi pripojí fázovací článok, ktorý bude merať podľa protokolu. Rozmery prípravku sú formátu A5.



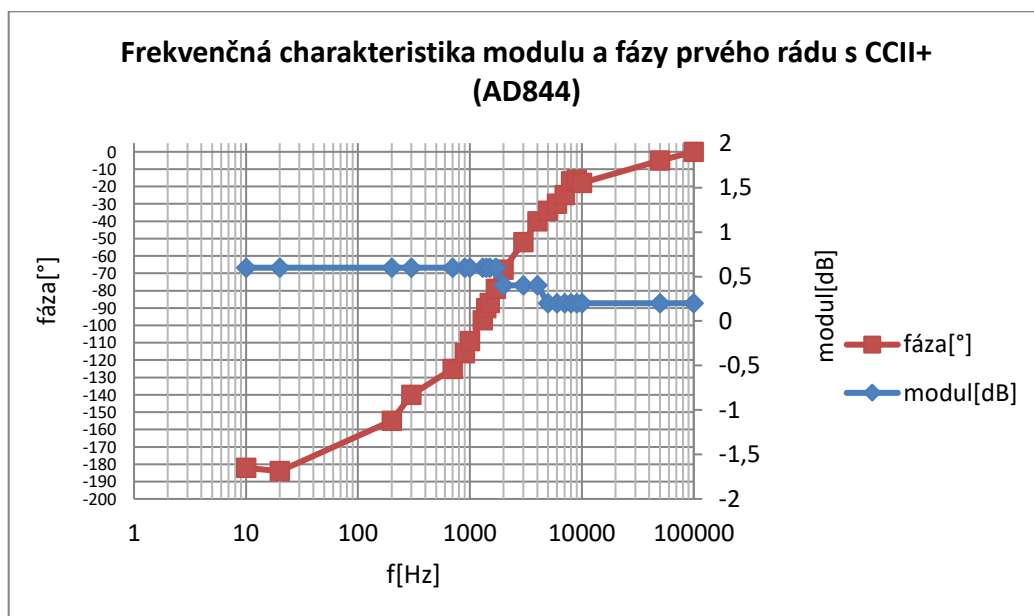
Obrázok 56: Vrchný motív laboratórneho prípravku

8. Zmerané frekvenčné charakteristiky



Obrázok 57: Zmeraná charakteristika fázy a modulu aktívneho fázovacieho filtra s TL072 (1.rádu)

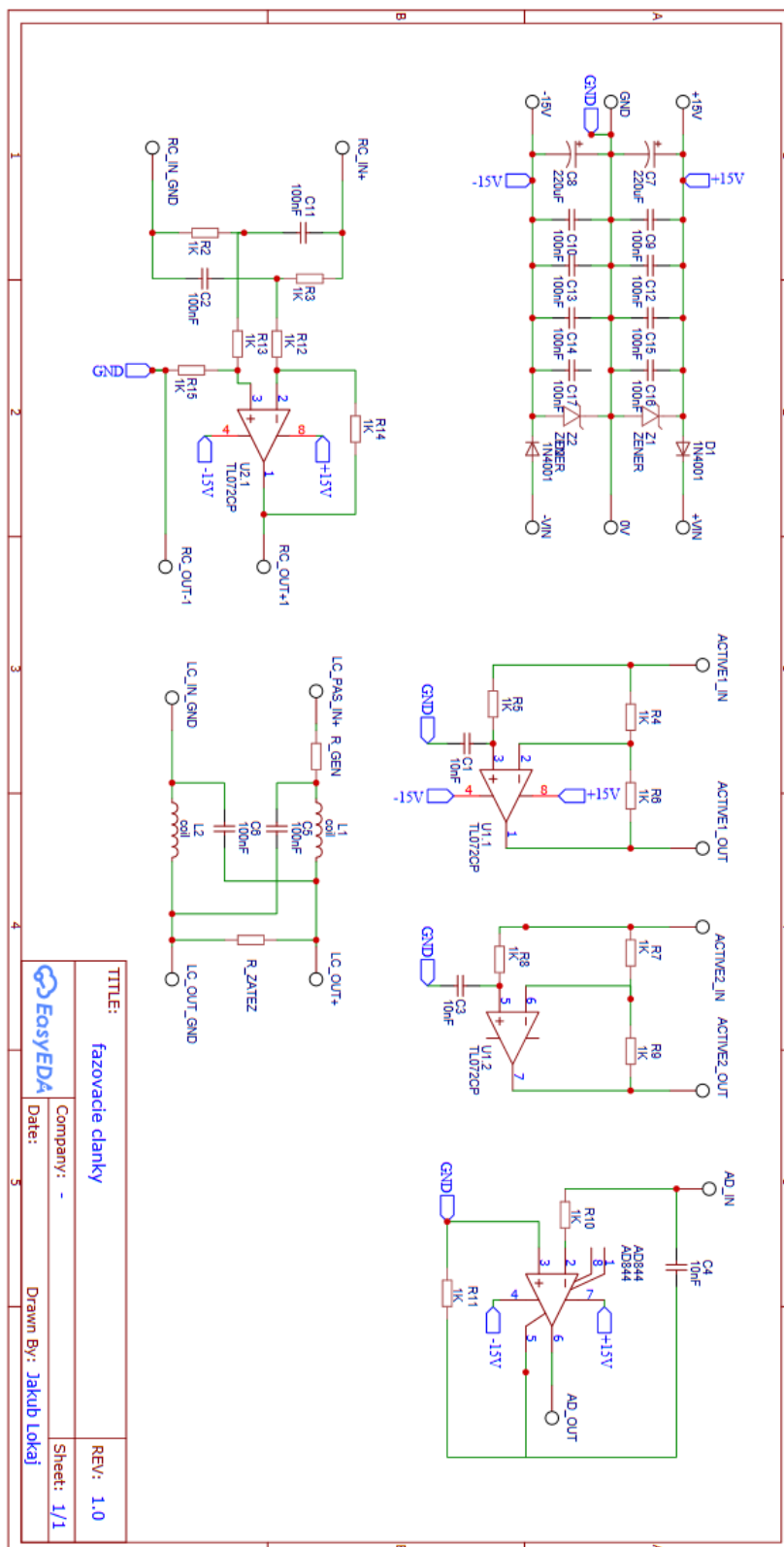
Z priebehu charakteristiky fázy je vidno, že pri 90° dosahuje kmitočet približne 1100Hz a že modul sa mení len od 0dB do 0,8dB. Pre porovnanie s rovnakým simulovaným obvodom je vidno, že priebeh modulu je od simulovaný skoro rovnaký (pri simulácii bol modul = 0dB v celom rozsahu frekvencie).



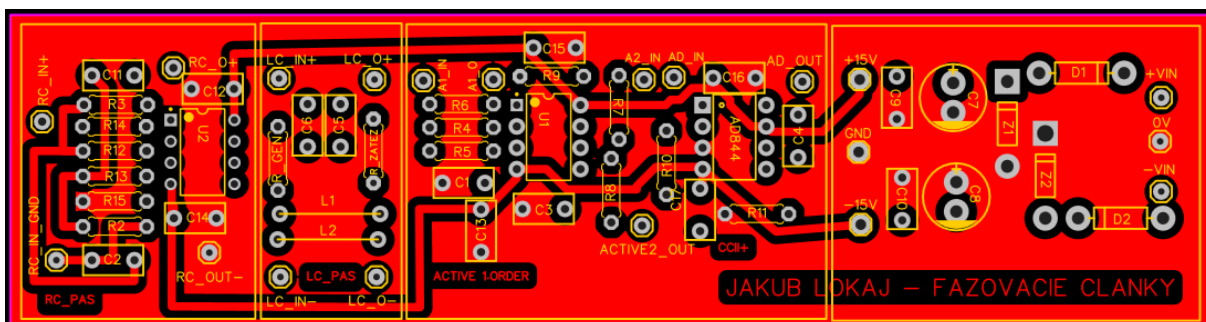
Obrázok 58: Zmeraná charakteristika fázy a modulu fázovacieho filtra 1.rádu s CCII+ (AD844)

Z nameraných hodnôt je patrné, že priebeh modulu sa od simulovaného obvodu veľmi nelíši. Modul dosahuje od 0dB do 0,6dB.

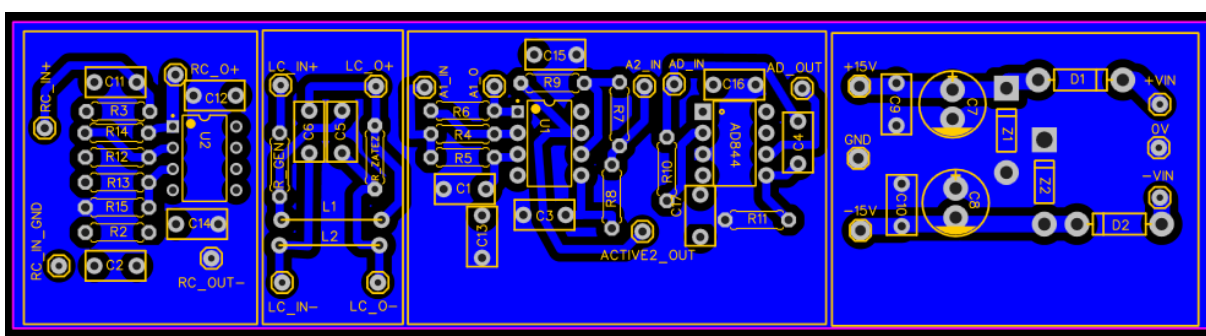
9. Schéma prípravku a doska plošného spoja



Obrázok 59: Schéma laboratórneho prípravku



Obrázok 60: TOP layer návrhu plošného spoja



Obrázok 61: BOTTOM layer návrhu plošného spoja

Návrh plošného spoja a schéma je dostupná online na EasyEda pod linkom repozitáara <https://easyeda.com/jabuk66/bakalarka>.

10. Vzor Laboratórne úlohy: Fázovacie filtre

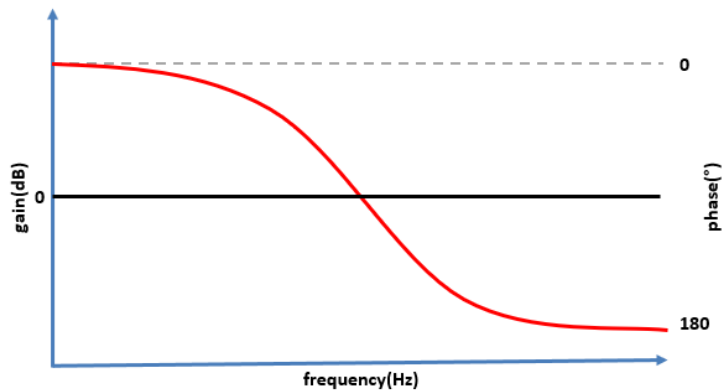
Teoretický úvod

Fázovacie články umožňujú upravovať fázovú charakteristiku bez zmeny modulovej charakteristiky. Využívajú sa v oneskorovacích článkoch, fázovacích korektoroch, vo vyrovnávačoch fázového posunu alebo namiesto integrátorov. Taktiež majú uplatnenie v meracej technike pri meraní fázových posunov.

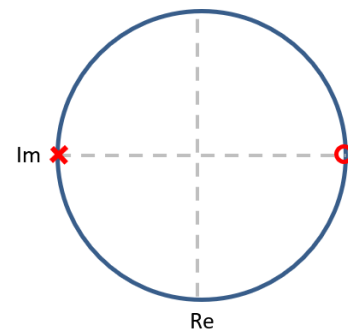
Pre všeobecný fázovací filter prvého rádu platí prenosová funkcia:

$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0}$$

Na obrázku 1. môžeme vidieť ideálny priebeh modulu (gain) a fáze (phase) fázovacieho článku 1. rádu. Na obrázku 2. je ideálne rozloženie núl a pólov.



Obrázok 62 Priebeh modulu a fáze fázovacieho filtra 1. rádu



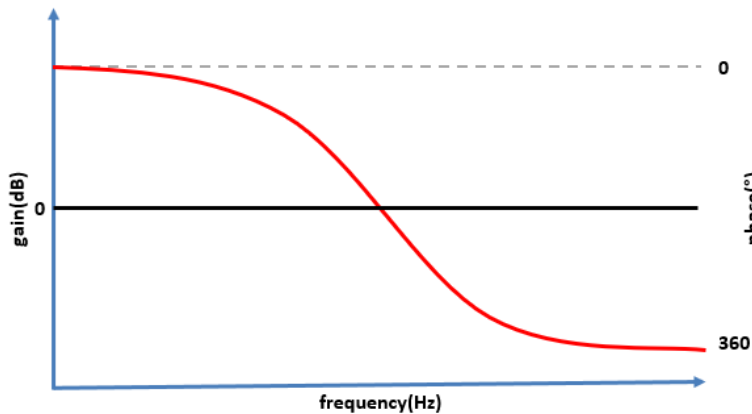
Obrázok 2: Rozloženie núl a pólov

Fáza sa pri fázovacom článku 1. rádu mení od 0 do $+\pi$. Pre stabilný obvod ležia póly vľavej pol roviny komplexnej roviny a nulové body vpravej pol roviny symetricky vzhľadom k imaginárnej ose komplexnej roviny.

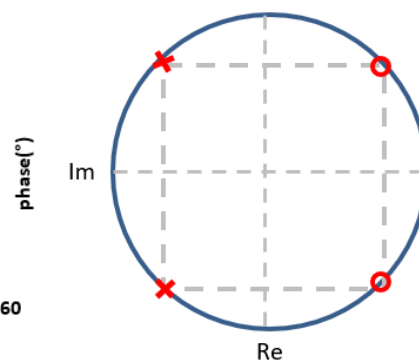
Prenosová funkcia fázovacieho článku 2. rádu je daná polynómom 2. stupňa, jej prenosová funkcia bude vyzeráť

$$K(s) = \frac{s^2 - s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

Na obr.3 a obr.4 môžete vidieť priebeh modulu, fáze a rozloženie nulových bodov a pólov.

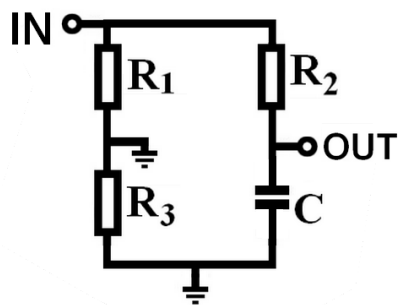


Obrázok 3: Priebek modulu a fáze fázovacieho filtra 2. rádu

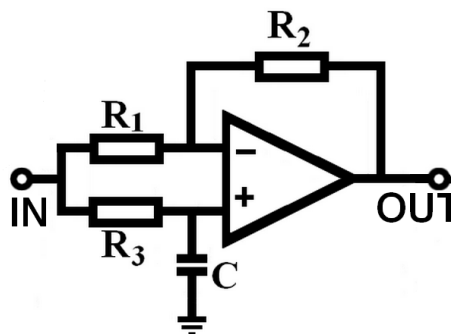


Obrázok 4: Rozloženie núl a pólov

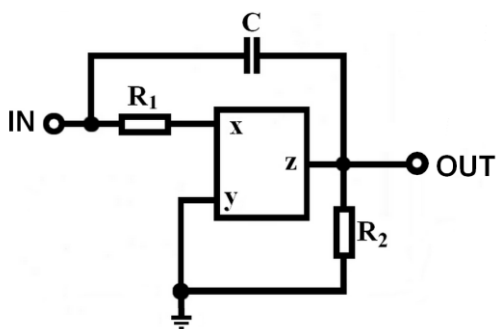
Na laboratórnom prípravku sa nachádzajú fázovacie články typu:



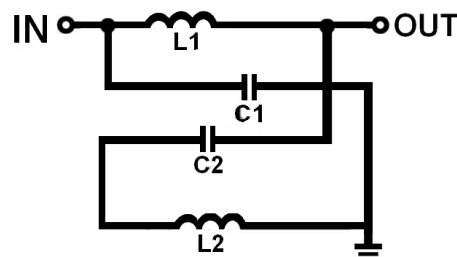
Obrázok 5: Pasívny 1. rádu



Obrázok 6: Aktívny 1. rádu



Obrázok 7: Prúdový konvektor CCII+



Obrázok 8: LC pasívny

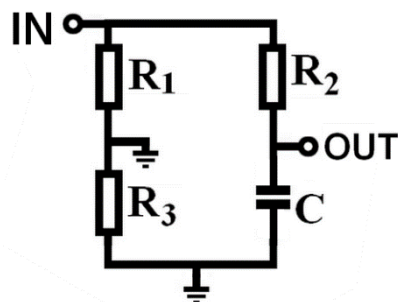
Význačný kmitočet pre aktívny fázovací článok 1. vieme vypočítať vzťahom: $f = \frac{1}{2\pi RC}$

Návod k meraniu

1. Zmerajte modul a fázu napät'ového prenosu pasívneho fázovacieho článku 1. rádu pre zadané kmitočty. Modul budete merať pomocou dvojkanálového AC milivoltmetra. Na vstup pripojíte kanál1 a na výstup kanál 2. Modul je možné odčítať rovno ako rozdiel vychýlok oboch ručičiek. Meranie fázy prebieha pomocou automatického merania v osciloskope pomocou voľby **Measure > Phase**.

Meranie frekvenčnej charakteristiky modulu a fáze *pasívneho* fázovacieho filtra 1. rádu

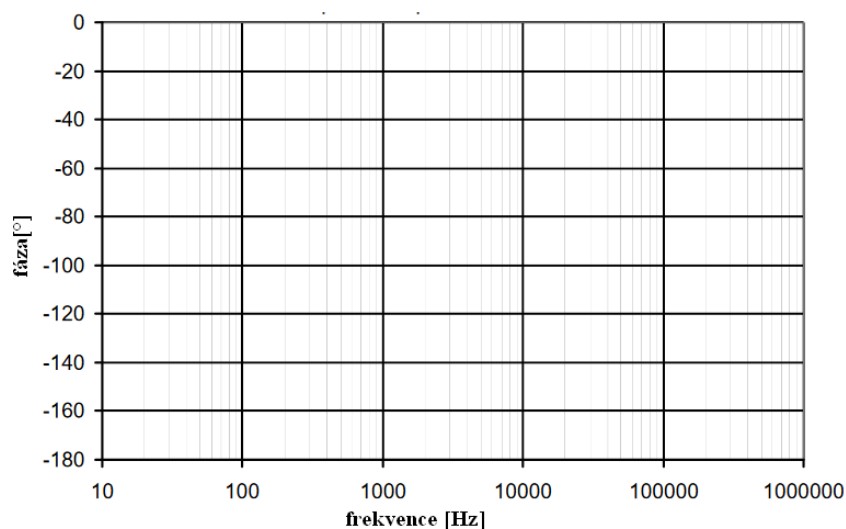
Schéma:



Frekvencia [Hz], pri ktorej dosahuje fáza $[90^\circ]$ =

f[Hz]	modul[dB]	fáza[°]
10		
50		
100		
200		
500		
700		
1000		
1200		
1300		
1400		
1500		
1600		
1700		
1800		
1900		
2000		
3000		
5000		
7000		
10000		

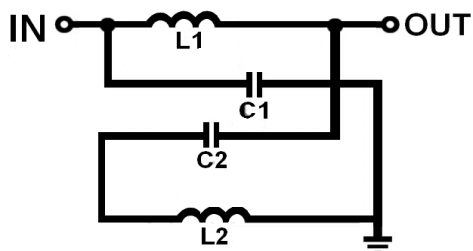
Modulová a fázová kmitočtová charakteristika RC fázovacieho filtra



Frekvencia [Hz], pri ktorej dosahuje fáza $[90^\circ]$ =

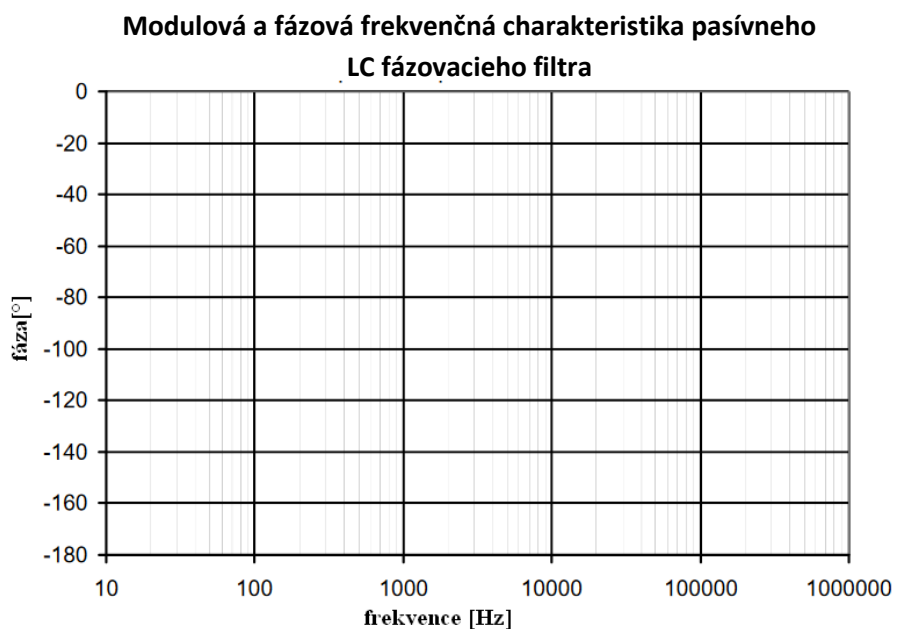
50000		
-------	--	--

2. Meranie frekvenčnej charakteristiky modulu a fáze aktívneho fázovacieho filtra 1. rádu **RLC**

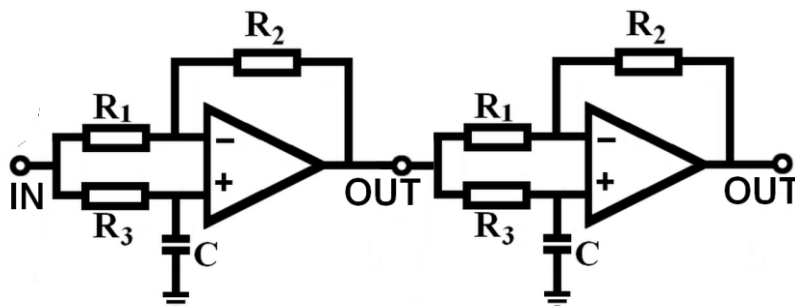


Frekvencia [Hz], pri ktorej dosahuje fáza
[90°] =

f[Hz]	modul[dB]	fáza[°]
10		
50		
100		
200		
500		
700		
1000		
1200		
1300		
1400		
1500		
1600		
1700		
1800		
1900		
2000		
3000		
5000		
7000		
10000		
50000		
200000		



3. Meranie frekvenčnej charakteristiky modulu a fáze aktívneho fázovacieho filtra 2. rádu (2x 1. rádu v kaskáde)



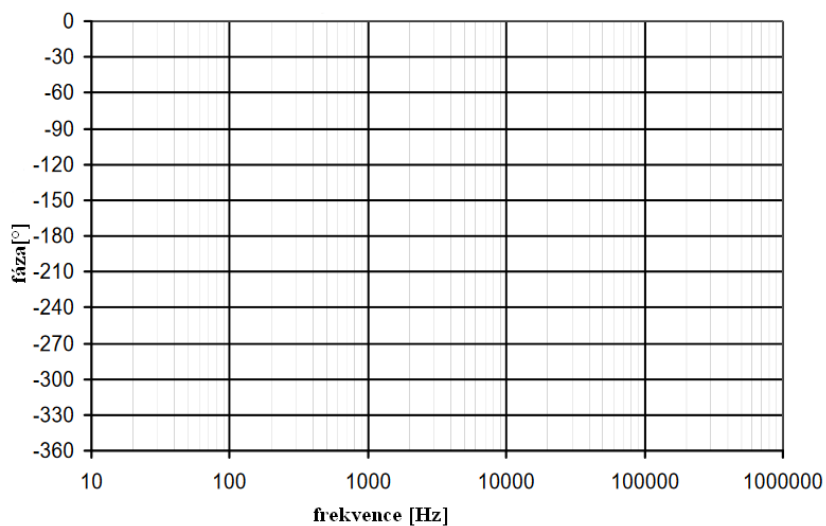
Vypočítajte význačný kmitočet jedného fázovacieho článku 1 rádu v kaskáde.

$$R = 1k\Omega \quad C = 10nF$$

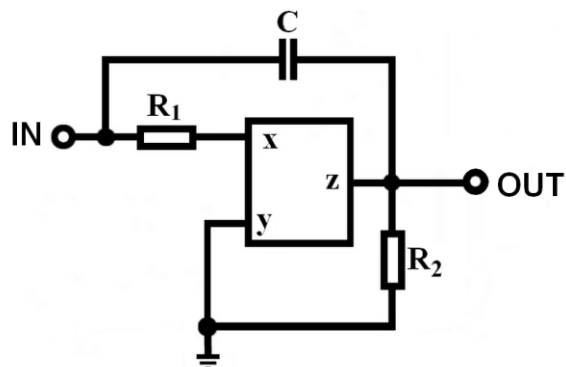
$f =$

f[Hz]	modul[dB]	fáza[°]
10		
50		
100		
200		
500		
700		
1000		
1200		
1300		
1400		
1500		
1600		
1700		
1800		
1900		
2000		
3000		
5000		
7000		
10000		
50000		
200000		

Modulová a fázová frekvenčná charakteristika aktívneho fázovacieho filtra 2. rádu



4. Meranie frekvenčnej charakteristiky modulu a fáze aktívneho fázovacieho filtra 1. rádu s prúdovým konvektorom CCII+



f[Hz]	modul[dB]	fáza[°]
10		
20		
200		
300		
700		
900		
1000		
1300		
		-90
1500		
1700		
2000		
3000		
4000		
5000		
6000		
7000		
8000		
9000		
10000		
50000		
100000		

5. Na generátore nastavte vhodný signál s amplitúdou $amp = 1V_{ef}$, sínusovým harmonickým priebehom a medzným kmitočtom $f = 1kHz$.

Vstup generátora privedieme na vstup (IN) aktívneho fázovacieho článku 1 rádu.

Vykreslený signál na osciloskope budeme sledovať na výstupe fázovacieho článku 1. rádu, na výstupe kaskády tvorenej z dvoch aktívnych fázovacích článkoch 1.rádu a na výstupe aktívneho fázovacieho článku CCII+.

Cez meracie body vykreslíme priebehy na osciloskope.

Označte osi a zvol'te vhodné merítka, pozorujte zmeny pri prechode rôznymi fázovacími filterami. Čím sa líšia? Okomentujte v závere



Záver

11. Záver

V tejto bakalárskej práci som rozobral základné princípy a vlastnosti fázovacích článkov. Prácu som rozdelil do dvoch častí, a to do časti pasívnych fázovacích článkov a aktívnych fázovacích článkov.

V prvej časti bol skúmaný fázovacích obvodov bol RC 1. rádu, ktorý bol simulovaný v programe SNAP a LTspice. Bol odvodený jeho prenos, vykreslené rozloženie núl a pólov, kde môžeme vidieť ich kompenzáciu na rovnakom kmitočte. Tak isto bol popísaný pasívny fázovací článok 1. a 2. rádu s RLC prvkami, jeho prenos a rozloženie pólov a núl, ktoré neboli vykompenzované, kvôli numerickým hodnotám indukčností a kapacít.

V druhej časti som sa zameral na fázovacie články s aktívnymi prvkami. Simuloval som štruktúru aktívneho fázovacieho článku 1. rádu s napäťovým zosilňovačom v programoch Snap a LTspice. Bola odvodená prenosová funkcia, vykreslené grafy modulu, fázy a skupinového oneskorenia. Fáza sa menila od 180° do 0° , fáza pri 90° boli približne na kmitočte 11kHz. Tak isto som simuloval a vytvoril štruktúru pre fázovací článok 2. rádu s operačným zosilňovačom. OZ som použil TL071. Využil som štruktúru bez kaskádneho zapojenia aktívnych prvkov. Modul v grafe sa v simulácii trochu zvlnil, tak isto ako fáza, ktorá mala schodovitý tvar, čo sa odrazilo aj na skupinovom oneskorení, ktoré malo výraznú špičku. Ako ďalšiu štruktúru s aktívnym prvkom som využil fázovací článok 1. rádu s pozitívnym prúdovým konvejšom druhej generácie. Na zapojenie a simulovanie obvodu som využil integrovaný obvod AD844. Výsledky simulácii sú podľa očakávaní. Priebeh fázy a modulu sú ideálne. Ako predposledný obvod som použil fázovací článok 1. rádu s aktívnym prvkom OTA. Na zapojenie som použil integrovaný obvod LT1228. Na demonštráciu fázovacieho obvodu s aktívnym prvkom OTRA som použil obvod AD844, simulácia prebiehala v programe LTspice.

V poslednej prebehlo praktické meranie dvoch zapojení. Namerané hodnoty sa líšili od nasimulovaných veľmi málo. Odchýlka bola od ideálne simulovaného zapojenia pri module len menej ako 1dB. Následne som vypracoval teoretickú a praktickú časť zadania laboratórneho protokolu. Navrhol som zapojenie v programe EasyEda a tak isto plošný spoj pre laboratórny prípravok.

LITERATÚRA

- [1] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J., *Kmitočtové filtry*, Praha: BEN – technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-023-7
- [2] DAVÍDEK, LAIPERT, VLČEK, *Analogové a číslicové filtry*, 2006 ČVUT, ISBN 80-01-03026-1
- [3] *Elektrorevue* [online]. *Obecný tříbranový proudový konvektor a jeho využití při návrhu obvodů* [cit. 25.11.2019]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00002/index.html>
- [4] *Elektrorevue* [online] BIOLEK, D., *Nová knihovna modelů volně šiřitelného programu SNAP 2.6x pro analýzu obvodů (nejen) v proudovém módu*. 2004/44 - 23.8.2004. [cit. 25.11.2019]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04044/index.htm#3>
- [5] *Radioengineering*, [online] DOSTAL T. *All-pass Filters in Current Mode*. ISSN: 1210- 2512. Dostupné z: dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/58012/05_03_48_53.pdf
- [6] PETRŽELA, J. *Elektrické filtry*. Online přednášky. FEKT VUT v Brně, 2011
- [7] PAL, K., RANA, S. (2004). *Some New First-Order All-Pass Realizations Using CCII. Active and Passive Electronic Components*, 27(2), 91–94. doi: 10.1080/0882751031000116188
- [8] WILLIAMS A., TAYLOR F., 2006. *Electronic Filter Design Handbook, Fourth Edition* (Mcgraw-Hill Handbooks). McGraw-Hill Professional. ISBN:0071471715
- [9] T. DELIYANNIS, Y. SUN, J.K. FIDLER, *Continuous-Time Active Filter Design*, Published December 16, 1998, ISBN 9780849325731
- [10] WINDER. S., *Analog and Digital Filter Design 2nd Edition*, eBook ISBN: 9780080488332, Published Date: 11th October 2002
- [11] CHAICHANA, A., SIRIPONGDEE, S., & JAIKLA, W. (2019). *Electronically Adjustable Voltage-mode First-order Allpass Filter Using Single Commercially Available IC*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 559, 12009. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/559/1/012009>
- [12] CAKIR, C., CAM, U., & CICEKOGLU, O. (2005). *Novel allpass filter configuration employing single OTRA*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 52(3), 122–125. doi:10.1109/tcsii.2004.842055
- [13] www.analog.com [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. LT1228: *100MHz Current Feedback Amplifier with DC Gain Control*. Dostupné z URL: www.analog.com/en/products/lt1228.html
- [14] www.analog.com [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. AD844 *60MHz, monolithic op amp with quad low noise*. Dostupné z URL: www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD844.pdf
- [15] www.ti.com [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. TL07xx *Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers*. Dostupné z URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl071.pdf>